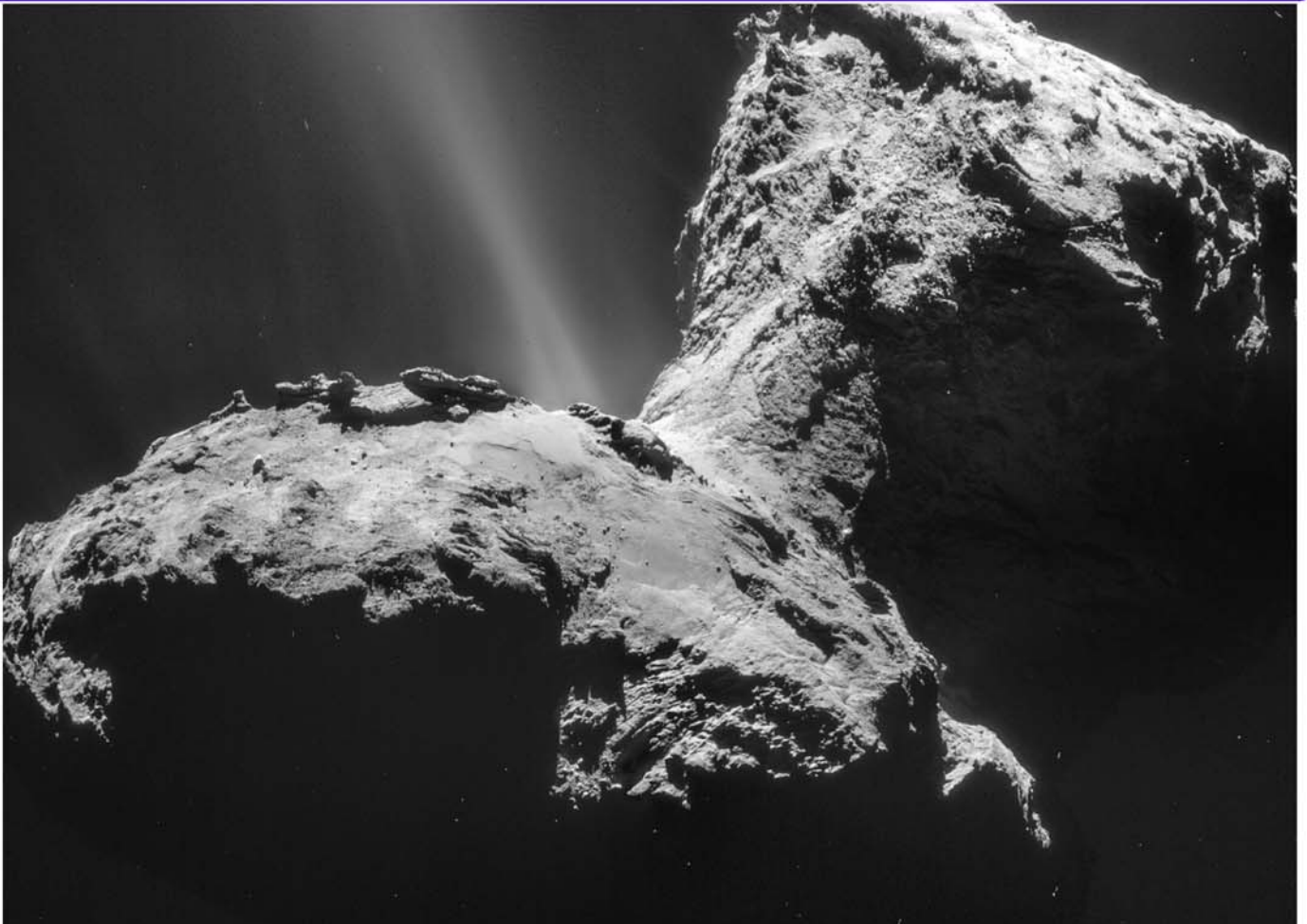


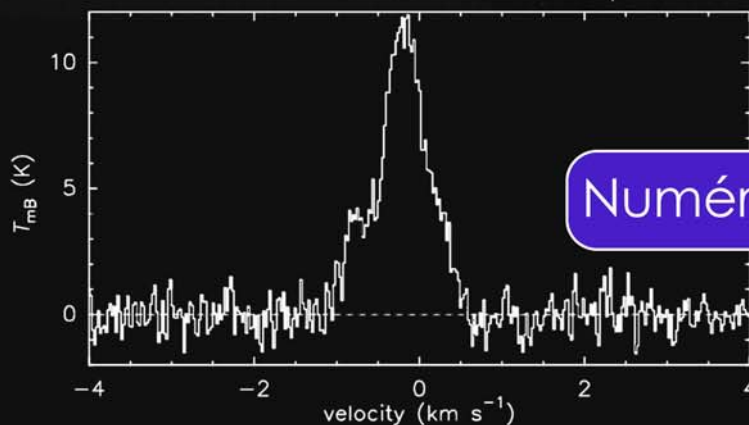
# LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 149 - Mars 2015 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



67P/C.G.: H<sub>2</sub>O(110-101) 557GHz: 6-July-2014: 4h36-6h51 UT



Numéro 149 - printemps 2015

# Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

## Présidents d'honneur :

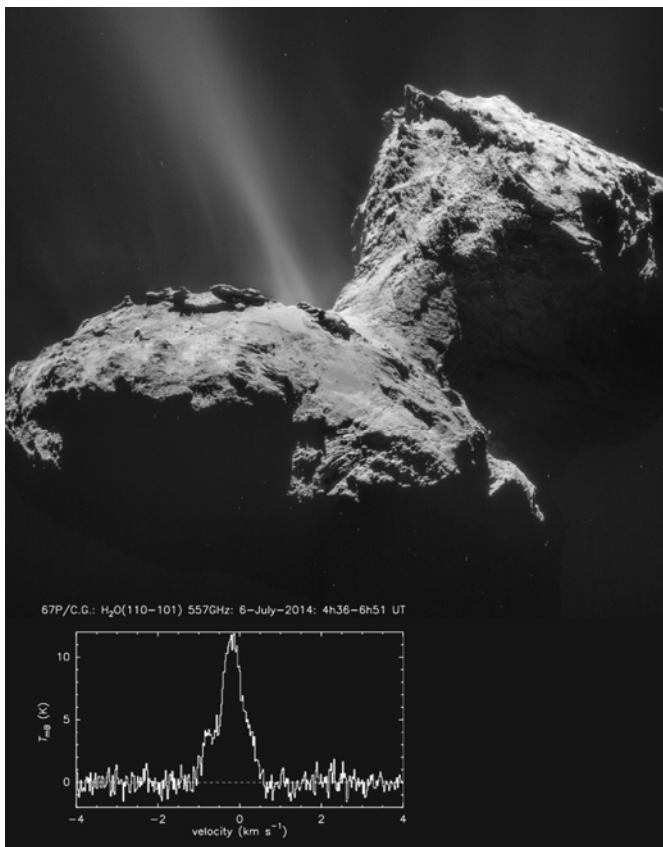
Jean-Claude Pecker  
Lucienne Gouguenheim  
Georges Paturol

## Bureau du CLEA pour 2014

**Présidente :** Cécile Ferrari  
**Trésorière :** Roseline Jamet  
**Trésorière adjointe :** Sylvie Thiault  
**Secrétaire :** Danièle Imbault  
**Secrétaire adjoint :** Jean-Luc Fouquet

## Responsables des groupes

**Vie associative :** Jean-Michel Vienney  
**Cahiers Clairaut :** Christian Larcher  
**Productions Pédagogiques :** Pierre Causeret  
**Communication :** Charles-Henri Eyraud  
**École d'Été d'Astronomie :** Danièle Imbault  
**Responsables du site :**  
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Thomas Appéré, Mathieu Barthélémy, David Bernard, Francie Berthomieu, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Juan Castiella Llorente, Bernard Colomb, Charles-Henri Eyraud, Cécile Ferrari, Satur Garcia Marin, Olivier Gayraud, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, James Lequeux, Jean Lilensten, Daniel Paupart, Jean Ripert, Pierre Thomas, Sylvie Vauclair, Liliane Vilas-Sarrazin.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 149, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

## Image de couverture : Superposition de deux images

**Image du haut :** La comète Tchourioumov-Guérassimenko imagée le 31 janvier 2015. Il s'agit d'une mosaïque de 4 images prises à une distance de 28 km. La résolution est de 2,4 m/pixel. Crédits ESA / Rosetta / NAVCAM

**Image du bas :** Une des raies de l'eau observée dans un spectre de MIRO le 6 juillet 2014, correspondant à une production d'eau d'environ 0,5 kg/s. La raie centrale correspond à une raie de l'eau légèrement décalée en vitesse dans le bleu car les molécules d'eau sont libérées en direction de la sonde.

Crédits : ESA/Rosetta/NASA/JPL-Caltech/MPISR/CNRS-Observatoire de Paris LERMA-LESIA.

# Les Cahiers Clairaut

Printemps n° 149

## Éditorial

Notre Terre, la planète bleue, est recouverte à 70 % par de l'eau liquide. Cette eau liquide fait sa spécificité, elle est source de l'exubérance de la vie à sa surface et dans la profondeur des océans. D'où vient cette eau, comment est-elle apparue ? Provient-elle seulement des entrailles de Gaïa ou bien est-elle issue, en partie, des grandes voyageuses en provenance de la ceinture de Kuiper et du nuage de Oort ou encore des météorites venues des profondeurs des espaces infinis ? Qu'en est-il pour les autres planètes ? Le thème de ce numéro tente d'esquisser des réponses à ces questions (Cécile Ferrari ; Pierre Thomas).

L'eau liquide présente des propriétés physiques et chimiques étonnantes très différentes des autres substances de la même famille. Son exceptionnel pouvoir solvant favorise de nombreux échanges, en particulier sur Terre avec l'atmosphère gazeuse qui l'entoure (David Bernard). Ce subtil mécanisme, qu'il nous faut à tout prix préserver sur Terre, fonctionne grâce à l'énergie fournie par notre étoile le Soleil.

Notre Soleil est maintenant ausculté avec finesse. Son étude débuta au XIX<sup>e</sup> siècle avec la spectroscopie qui apporta un contredit aux certitudes d'Auguste Comte ; celui-ci estimait en effet que sa connaissance nous resterait à jamais inaccessible faute de pouvoir transporter un observateur à sa surface.

James Lequeux nous explique qu'en 1901 Charles Nordmann chercha à « écouter » le Soleil à l'aide du premier détecteur radio, le radioconducteur à limaille de fer d'Édouard Branly, puis il nous décrit l'histoire de la radioastronomie en France à laquelle il participa. Sylvie Vauclair nous indique que la petite musique émise par le Soleil est approximativement en sol dièse, voilà qui conforte l'idée d'une « musique des sphères » décrite initialement par Pythagore puis Kepler. Je vous suggère d'écouter une composition adaptée sur :

[http://www.cslevine.com/etoiles/youtube\\_musique.htm](http://www.cslevine.com/etoiles/youtube_musique.htm)

Christian Larcher, pour l'équipe.

L'école d'été d'astronomie  
du CLEA aura lieu  
**du 17 au 24 août 2015**  
près de Gap  
les inscriptions sont ouvertes  
[clea-astro.eu/aLaUne/EcoledEtedAstronomie2015](http://clea-astro.eu/aLaUne/EcoledEtedAstronomie2015)

## Histoire

### Histoire de la radioastronomie en France

James Lequeux p 2

### Thème : L'EAU

p 6

### Article de fond

#### L'origine de l'eau

Pierre Thomas p 6

### Article de fond

#### Le cycle actuel de l'eau sur Mars

Thomas Appéré p 9

### Avec nos élèves

#### L'eau et la vie ailleurs

Olivier Gayard p 14

### Jeux

#### Mots croisés "l'eau"

Pierre Causeret p 16

### Article de fond

#### L'origine de l'eau sur Terre

Cécile Ferrari p 17

### Avec nos élèves

#### Un thème de SVT en seconde

Bernard Colomb p 21

### Coin des petits curieux

#### Que d'eau !

Jean Ripert p 25

### Ciel de printemps

Pierre Causeret p 26

### Reportage

#### L'association astronomique de Huesca

Juan Castiella Llorente, Satur Garcia Marin p 27

### Article de fond

#### La nouvelle musique des sphères

Sylvie Vauclair p 29

### Article de fond

#### Histoire de l'atmosphère de la Terre (partie 2)

D. Bernard, M. Barthélémy, J Lilensten p 34

### Vie association

#### Journée de formation académique à Bordeaux

Daniel Paupart p 39

### Jeux

#### Solutions mots croisés

Pierre Causeret p 40



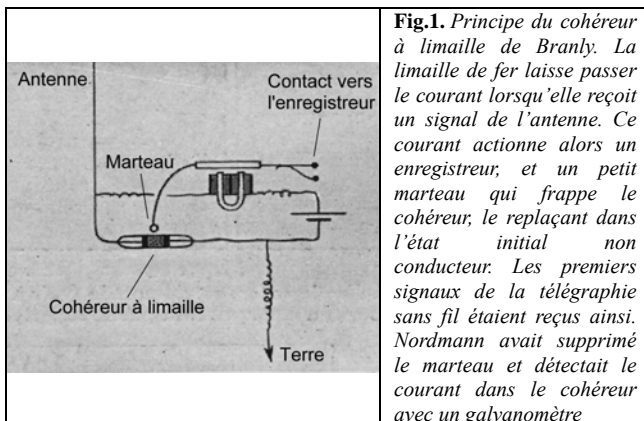
## Histoire de la radioastronomie en France : 1901-1980

James Lequeux, astronome émérite de l'Observatoire de Paris

À la mémoire de Jean-François Denisse (1915-2014), fondateur de la radioastronomie française, qui fut mon directeur de thèse.

### Un précurseur : Charles Nordmann (1881-1940)

Les ondes radio ont été découvertes en 1888 par Heinrich Hertz (1857-1894) qui les produisait en faisant éclater un arc électrique. Ceci a donné à l'astronome français Henri Deslandres (1853-1948) l'idée que le Soleil, dont il pensait que l'activité était d'origine électrique, pourrait émettre des ondes radio. Il en parla probablement à un jeune astronome de l'observatoire de Meudon, Charles Nordmann, qui décida de tenter une détection des ondes radio solaires. À cet effet, il installa au dessus du glacier des Bossons, près de Chamonix, un fil conducteur de 175 m de long faisant antenne, porté par des poteaux de bois et relié à une variante du seul détecteur d'ondes radio alors disponible, le cohéreur à limaille de Branly. Il s'agissait d'un tube de verre rempli de limaille de fer, connecté d'un côté à l'antenne et de l'autre au sol et soumis à une différence de potentiel créée par une pile (figure 1).



Les grains de fer sont normalement couverts d'une très mince couche d'oxyde isolant, et le détecteur ne laisse pas passer le courant. Cependant, le passage d'une onde radio provenant de l'antenne produit une destruction de l'oxyde au niveau des interfaces entre les grains, et le détecteur devient conducteur. Pour le remettre dans son état initial, il suffit de le frapper d'un coup sec, ce qui déplace les grains si bien que le courant ne passe plus.

Nordmann, aidé d'un ingénieur électricien nommé Habercorn, fit l'expérience le 19 septembre 1901, sans

succès. Son échec tient à plusieurs causes : l'antenne était surtout sensible aux ondes hectométriques qui sont arrêtées par l'ionosphère terrestre, et le Soleil était dans un minimum d'activité.

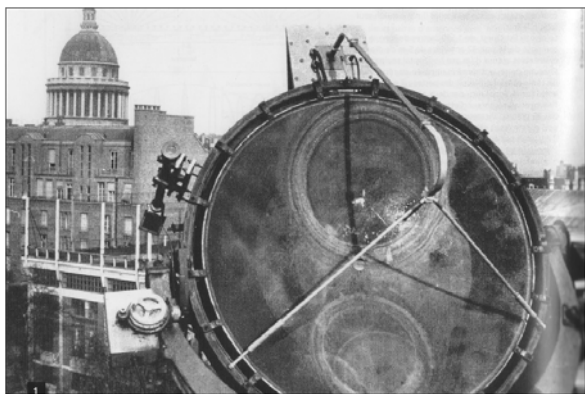
S'il avait fait l'expérience pendant une période de maximum d'activité et capté l'émission radio intense d'un sursaut solaire, elle aurait peut-être réussi. Quoiqu'il en soit, Nordmann resta persuadé que le Soleil devait émettre des ondes radio, et ce fut même l'objet de sa thèse de doctorat. Des essais faits indépendamment en Allemagne et en Angleterre avec des détecteurs encore moins sensibles ne donnèrent pas plus de résultats.

### La naissance de la radioastronomie en France

Les choses en restèrent là jusqu'à ce que Karl Jansky (1905-1950), un ingénieur des Bell Telephone Laboratories dans le New Jersey, découvre par hasard en 1933 l'émission radio de la Voie lactée. Celle-ci fut cartographiée pour la première fois par un autre ingénieur radio, Grote Reber (1911-2002), qui avait construit dans son jardin une antenne parabolique de 9 m de diamètre. Bien que ces observations aient été publiées dans des revues connues et aient même fait la une du New York Times, les astronomes n'y prêtèrent aucune attention, à l'exception du seul Jesse Greenstein (1909-2002), un astronome du California Institute of Technology. En 1942, un troisième ingénieur radio, James Stanley Hey (1909-2000), découvrait par hasard en Angleterre qu'un radar pointé vers le Soleil était fortement perturbé par une émission radio venant de l'astre. Cette découverte, mise à profit par la Royal Air Force pour échapper aux radars allemands pendant ses attaques, est restée secrète jusqu'à la fin de la guerre.

Le physicien français Yves Rocard (1903-1992), très actif dans la Résistance et qui avait pu se rendre en Angleterre à cette époque, était cependant au courant car il y avait travaillé au radar. Nommé directeur du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure (ENS) en 1945, à l'issue de la guerre, il créa en 1946-7 le premier groupe de radioastronomie avec un jeune physicien qui venait d'arriver, Jean-François Denisse (1915-2014), bientôt rejoint par d'autres jeunes gens, parmi lesquels je citerai Émile-Jacques Blum (1923-

2009) et Jean-Louis Steinberg. Aucun n'avait de formation en astronomie. Ils utilisèrent un ancien projecteur américain de défense contre avions de 1,5 m de diamètre (figure 2), pour détecter l'émission du Soleil à 3 cm de longueur d'onde (une première), puis une antenne de 3 m de diamètre, un ancien radar allemand. En parallèle, Marius Laffineur (1904-1987), un ingénieur radio, créait en 1946 à l'Institut d'Astrophysique un groupe qui ne comptait jamais que deux personnes : ce groupe collabora un temps avec le groupe de l'ENS, réalisa des observations solaires puis construisit à l'Observatoire de Haute-Provence un radiotélescope assez important, terminé en 1959, qui ne produisit malheureusement guère de résultats intéressants. Il disparut vers 1967.

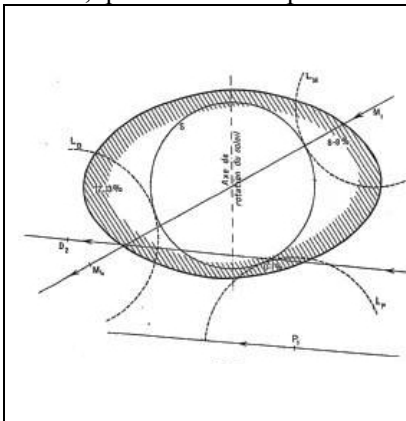


**Fig.2.** Projecteur utilisé comme radiotélescope, sur la terrasse du Laboratoire de physique de l'ENS, rue Lhomond à Paris. On voit au fond la coupole du Panthéon. Remarquer le cornet focal et le guide d'ondes qui transmet le signal reçu au récepteur situé à l'arrière, non visible.

Bien entendu, la France n'était pas le seul pays à se lancer dans la radioastronomie. Tous les pays développés le firent, car ils possédaient des ingénieurs radio qui se trouvaient quelque peu désœuvrés à l'issue de la Guerre. C'est ainsi que l'on comptait au début des années 1950 2 groupes importants de radioastronomie en Angleterre, 3 en Australie, au moins 5 aux USA, 3 en URSS, et 1 en Allemagne, au Canada, au Japon et aux Pays-Bas. Tous ces groupes se développèrent en dehors des instances astronomiques traditionnelles, et présentaient plus souvent leurs résultats aux congrès de l'Union Radio Scientifique Internationale (URSI) qu'à ceux organisés par l'Union Astronomique Internationale (UAI).

La radioastronomie débutante se heurtait à une grande difficulté : le manque de résolution angulaire. En effet, le pouvoir de résolution d'un télescope ou d'un radiotélescope est de l'ordre de  $\lambda/d$  radian, où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $d$  son diamètre. Si une petite lunette de 10 cm de diamètre suffit pour atteindre une résolution de 1 seconde de degré, il faudrait un radiotélescope de 40 km de diamètre pour obtenir ce résultat à 20 cm de longueur d'onde ! Une façon de contourner cette difficulté est d'utiliser l'occultation de la source d'ondes radio par la Lune, à condition

évidemment que ce phénomène survienne. C'est ce qu'a fait à quatre reprises le groupe français en observant des éclipses de Soleil, notamment l'éclipse annulaire du 1<sup>er</sup> septembre 1951 à Markala, actuellement au Mali. Le résultat est qu'en ondes métriques le Soleil est nettement plus gros que le disque visible, et aplati (figure 3) : le rayonnement radio vient de la couronne solaire. Ce fut le début d'une collaboration avec les astronomes spécialistes du Soleil, qui s'est révélée par la suite fort fructueuse.



**Fig.3.** Forme du Soleil radio en ondes métriques, résultant d'observations pendant deux éclipses. La position de la Lune est indiquée au moment où elle tangente le disque optique du Soleil (cercle central, ainsi que son trajet par rapport au Soleil. La forme du Soleil radio est l'ovale hachuré.

Les limitations de cette méthode sont évidentes. Aussi de nombreux groupes de radioastronomie ont développé des interféromètres formés de plusieurs antennes connectées électriquement. La résolution angulaire est alors  $\lambda/D$  radian, où  $D$  est la distance entre les antennes les plus éloignées. En France, on a eu la chance de bénéficier des compétences de Jacques Arzac (1929-2014), issu de l'école d'optique française qui avait développé la théorie de la formation des images par les instruments d'optique. Il a construit en 1952 un interféromètre solaire qui comportait 2, antennes fonctionnant à 3 cm de longueur d'onde, porté à 4 antennes en 1955. Il était installé à Marcoussis, au sud de Paris, où se trouvait un laboratoire de la Marine nationale (Rocard était amiral de réserve). Ce devait être le premier d'une longue série.

### **Les antennes Würzburg et la création de la station de Nançay**

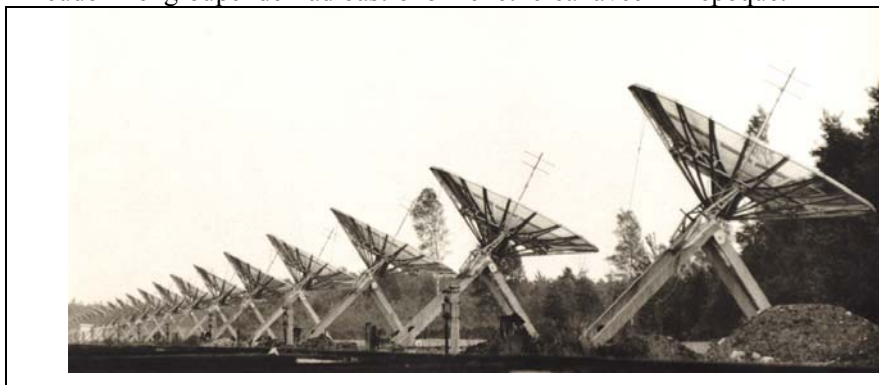
Les Allemands ont construit pendant la deuxième guerre mondiale environ 600 radars géants du type Riese-Würzburg, ainsi nommés car ils étaient fabriqués dans cette ville ; ils comportaient une antenne parabolique de 7,5 m de diamètre, d'excellente qualité. En 1949, Yves Rocard en a récupéré trois qui ont été utilisés comme radiotélescopes. L'un d'eux fut dévolu à Laffineur, qui l'a monté à l'Observatoire de Meudon et l'a utilisé pour des observations du Soleil. Il a été transporté en 1962 à l'Observatoire de Bordeaux. Les deux autres ont été installés à Marcoussis, au sud de Paris, où se trouvait un laboratoire de la Marine nationale. Seul l'un d'eux a été utilisé pour des observations du Soleil, puis pour faire avec plusieurs

collègues une carte de la Voie lactée radio, à 30 cm de longueur d'onde (ce fut mon travail de diplôme d'études supérieures en 1954-1955). La résolution était meilleure que celle de la carte de Reber, et on y voit nettement des sources discrètes d'onde radio. Nous ignorions à l'époque l'origine du rayonnement radio de la Voie lactée et de ses sources, car nous ne savions pas que l'astronome soviétique Iosif Shklovskii (1916-1985) avait suggéré en 1949 que le mécanisme synchrotron (l'émission d'électrons de très haute énergie dans un champ magnétique) pouvait rendre compte de l'émission de certaines radiosources, mécanisme étendu en 1950 à la Voie lactée dans son ensemble par l'allemand Karl Otto Kiepenheuer (1910-1975) : aucun d'entre nous n'avait de connaissances en astronomie, et nous n'étions guère au courant de la littérature spécialisée.

En 1953, Rocard voulait de la place dans son laboratoire pour de nouvelles activités, et André Danjon (1890-1967), qui dirigeait l'Observatoire de Paris et en fait toute l'astronomie française, accueillit à Meudon le groupe de radioastronomie et créa avec

l'ENS une station de radioastronomie dans un lieu à l'abri des parasites industriels, déjà gênants à l'époque. Ce fut la station de Nançay, près de Vierzon dans le Cher, dont le terrain acheté en 1954 appartient toujours à l'ENS, et les installations au CNRS et à l'Enseignement supérieur. On y transporta progressivement les instruments de l'ENS et de Marcoussis et on en construisit d'autres, dont un grand interféromètre pour l'étude du Soleil, mis en service en 1956 (figure 4). Quant aux deux würzburgs de Marcoussis, ils y furent aussi transportés en 1955, montés en équatorial et rendus déplaçables sur une longue voie ferrée, de façon à en faire un interféromètre à deux antennes mobiles (figure 5).

C'est grâce aux observations faites avec cet instrument que j'ai soutenu en 1962 ma thèse de doctorat, commencée en 1959 à mon retour d'un long service militaire qui m'avait cependant laissé le temps d'écrire avec Jean-Louis Steinberg un petit traité de radioastronomie qui, traduit en anglais et en russe, fut utilisé par la plupart des jeunes radioastronomes de l'époque.



**Fig.4.** Le grand radio-héliographe de Nançay, état en avril 1957. Il comportait 32 antennes de 5 m de diamètre espacées de 50 m dans la direction est-ouest, auxquelles se sont ajoutées en 1960 8 antennes de 10 m dans la direction nord-sud. Cet instrument profondément modifié est utilisé aujourd'hui pour obtenir des images instantanées du Soleil radio.



**Fig.5.** Les deux antennes de l'interféromètre à base variable de Nançay. Ce sont des antennes de radar Würzburg placées sur une monture équatoriale, dont l'axe de rotation est parallèle à celui de la Terre, ce qui permet de suivre le mouvement diurne des sources avec un seul mouvement lent.

L'interféromètre à deux antennes fut le premier instrument non solaire de Nançay. Il permit de cartographier 15 radiosources galactiques et 25 extragalactiques, dont la structure double que certaines présentent fut découverte. Mais il dut être abandonné en 1963 face à la concurrence d'interféromètres étrangers plus sensibles

## Le grand radiotélescope

Cependant, les radioastronomes français rêvaient dès 1953 d'un grand instrument pour étudier les galaxies dans la raie 21 cm de l'hydrogène atomique, découverte deux ans auparavant. Plusieurs grands radiotélescopes étaient en construction à l'étranger, et la période était favorable pour obtenir en France les fonds nécessaires. Deux concepts s'affrontaient : un interféromètre à deux antennes mobiles de l'ordre de 25 m de diamètre, un projet défendu par Steinberg, ou une antenne unique inspirée du radiotélescope de l'Ohio State University, défendue par Denisse. C'est ce dernier concept qui fut choisi en 1955 : l'interféromètre à deux würzburgs peut être compris comme un lot de consolation pour les tenants de l'interférométrie. Le financement du grand radiotélescope était acquis en 1957, et sa construction a commencé en 1959 ; en 1962, la première partie – 1/5 de l'instrument – était terminée, mais un important problème fut découvert : la compagnie responsable de la construction avait certes réalisé une bonne structure, mais elle était incapable d'en assurer le pointage vers les radiosources. Aussi quelques chercheurs, dont j'étais, ont dû d'atteler à une tâche à laquelle ils

n'étaient guère préparés avec l'aide de l'unique ingénieur du laboratoire. Finalement, l'instrument complet (figure 6) ne fut mis en service qu'en 1967, alors que nos homologues étrangers avaient déjà terminé leur grand instrument, en particulier les Australiens qui avaient réalisé dès 1961 le radiotélescope de 64 m de diamètre de Parkes, dont les performances étaient remarquables. Ceci eut des conséquences importantes :

- d'une part, Denisse, qui était devenu en 1963 directeur de l'Observatoire de Paris, créa en 1966 l'Institut National d'Astronomie et de Géophysique (INAG), dont le but premier était de réaliser les futurs grands projets dans de meilleures conditions ;

- d'autre part, certains chercheurs qui avaient sué sang et eau pour la réalisation du grand radiotélescope quittèrent temporairement ou définitivement le laboratoire (l'un d'eux, Michel Ginat, disparut en 1968 dans un accident de montagne), et d'autres se tournèrent vers de nouveaux projets.

Ceci n'empêcha pas le grand radiotélescope d'assurer ses missions, en particulier l'étude de l'hydrogène interstellaire dans les galaxies par la raie à 21 cm de l'hydrogène.



**Fig.6.** Le grand radiotélescope de Nançay. Il comporte un miroir plan mobile autour d'un axe est-ouest, formé de dix éléments, mesurant 200 × 40 m. Il envoie les ondes radio de la source vers le miroir concave fixe de 300 m × 35 m, qui les concentre sur des antennes situées entre les deux miroirs. Ces antennes se déplacent sur un chariot de façon à suivre l'image de la source pendant environ 30 minutes de part et d'autre de son passage au méridien.

## La création de l'IRAM

Après l'achèvement du grand radiotélescope, certains chercheurs, dont j'étais, regrettaient toujours l'interférométrie ; j'avais d'ailleurs passé l'année 1968 au California Institute of Technology, où j'avais utilisé un interféromètre à deux antennes de 27 m de diamètre dont l'équivalent aurait pu avoir été construit à Nançay. Et une vive concurrence pour l'observation de la raie à 21 cm était en train d'apparaître avec l'interféromètre de Westerbork en Hollande (1970) et le Very Large Array américain, dont une partie

fonctionnait déjà. En outre le radiotélescope de 100 m de diamètre d'Effelsberg en Allemagne était en construction, pour être mis en service en 1972. Devant cette compétition, une partie d'entre nous considéra que le grand radiotélescope serait un jour dépassé et qu'il fallait s'investir dans un nouveau projet, ce que refusaient les autres. Il en résulta une scission dans le groupe de radioastronomie, qui devait s'officialiser en 1980.

Le nouveau projet serait un interféromètre pour les ondes millimétriques. À dire vrai, les motivations scientifiques étaient au début assez vagues, mais elles se sont concrétisées avec la découverte en 1970 de nombreuses molécules interstellaires émettant en ondes millimétriques. Un petit interféromètre millimétrique prototype était en construction à l'Observatoire de Bordeaux depuis 1967, et fonctionnait en 1973 de façon très satisfaisante. Il fallait maintenant aux promoteurs – principalement Blum, Pierre Encrenaz et moi – faire accepter le projet aux autorités. Or les Allemands avaient de leur côté un projet de grande antenne en ondes millimétriques ; comme l'heure était à la collaboration franco-allemande, nous avons été priés de collaborer, ce qui avait d'ailleurs un sens car les deux instruments auraient été bien complémentaires. Après de nombreuses péripéties qu'il serait trop long de raconter ici, le projet commun a abouti en 1980 sous la forme de l'Institut de RadioAstronomie Millimétrique (IRAM), dont le siège est à Grenoble, avec un radiotélescope de 30 m en Espagne sur la Sierra Nevada près de Grenade, et un interféromètre à 4 antennes de 15 m de diamètre au plateau de Bure, près de Gap. L'Espagne s'est jointe au projet en 1990.

## Et aujourd'hui ?

Finalement nous étions trop pessimistes : le grand radiotélescope, muni d'une antenne focale et de récepteurs très performants, est toujours en service ; son programme scientifique principal porte sur le chronométrage des pulsars. Les instruments de l'IRAM sont en plein essor : le radiotélescope de 30 m est le meilleur instrument de ce genre dans le monde, et l'interféromètre du plateau de Bure est le plus grand de l'hémisphère nord en ondes millimétriques, avec ses 7 antennes de 15 m dont on espère porter le nombre à 12 dans quelques années. Il aura alors 1/3 de la surface du géant mondial de l'hémisphère sud, le Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), ce qui est loin d'être négligeable. Ainsi le petit groupe créé en 1957 dispose aujourd'hui de moyens d'observations dont il n'aurait jamais rêvé au départ. ■



# THÈME : L'EAU

## ARTICLE DE FOND

### L'origine de l'eau

Une interview de **Pierre Thomas** recueillie par Charles-Henri Eyraud

On trouve de l'eau partout, sur Terre, dans le système solaire ou dans les nuages interstellaires. Il nous a semblé intéressant d'essayer de retracer son origine depuis le Big Bang. Nous avons pour cela interrogé Pierre Thomas, professeur à l'ENS de Lyon et spécialiste de planétologie.

**CLEA.** Une molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. D'où provient l'hydrogène que l'on trouve dans la molécule d'eau ?

#### Pierre Thomas

L'hydrogène, à part peut-être celui qui est fait dans quelques réacteurs nucléaires, ne vient que du Big Bang. Le noyau d'hydrogène 1 ( $^1\text{H}$ ) c'est un proton, l'hydrogène 2 ( $^2\text{H}$ ) deutérium, c'est 1 proton et 1 neutron, l'hydrogène 3 ( $^3\text{H}$ ) tritium, 1 proton et 2 neutrons. L'origine du proton et du neutron, c'est le Big Bang. La nucléosynthèse qui a lieu lors du Big Bang ne donne que de l'hydrogène 1 et 2, de l'hélium  $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$ , et un chouia de lithium  $^7\text{Li}$  ; d'après les théoriciens, rien de plus lourd que  $^7\text{Li}$ .

**CLEA.** Et pour l'oxygène ?

#### Pierre Thomas

L'oxygène, c'est autre chose. Avec sa masse atomique de 16, 17 ou 18, il est arrivé plus tard. Les astronomes savent très bien comment se fait l'oxygène, il suffit de prendre 4 noyaux d'atomes d'hélium, de les fusionner, et ça donne de l'oxygène ;  $4 \times 4$ , ça fait de l'oxygène 16 ( $^{16}\text{O}$ ). Cela ne se crée pas directement, c'est d'abord la fusion de deux atomes d'hélium 4 et 4, qui donne du béryllium 8 ( $^8\text{Be}$ ), ça se passe dans les étoiles.  $^8\text{Be}$  est un corps radioactif qui a une période d'une fraction de seconde ; si, pendant cette fraction de seconde, il rencontre un troisième hélium avant de se désintégrer, on obtient du carbone (8 et 4, ça fait 12) ; et s'il en rencontre un quatrième, ça fait de l'oxygène. Cela se passe à une température d'à peu près 100 millions de degrés, donc ça ne se rencontre pas dans une étoile comme le Soleil qui est beaucoup trop froide (le cœur du Soleil, c'est 15 millions de degrés), ça se fait dans les étoiles beaucoup plus chaudes qu'on appelle des géantes rouges où la température plus élevée permet de fusionner l'hélium pour faire du carbone et de l'oxygène.

Et quand cette étoile continue sa petite vie, quand il n'y a plus d'hélium, grosso modo, le cœur se contracte

parce qu'il n'y a plus assez d'énergie pour contenir la gravité ; si le cœur se contracte, il se réchauffe ; s'il se réchauffe, la température va atteindre plusieurs centaines de millions de degrés, et là d'autres réactions nucléaires sont possibles, par exemple deux atomes de carbone peuvent fusionner pour faire un atome de magnésium 24 ( $^{24}\text{Mg}$ ) ; un atome de carbone et un d'oxygène font un atome de silicium 28 ( $^{28}\text{Si}$ ), deux atomes d'oxygène peuvent fusionner pour donner un atome de soufre 32 ( $^{32}\text{S}$ ) et ainsi de suite. Le cœur d'une étoile, c'est un ascenseur à Mendeleïev, un giga réacteur à fusion nucléaire.

En résumé, une étoile comme le Soleil ne fait dans son cœur que de l'hélium (à 15 millions de degrés). L'étape d'après (100 millions de degrés), l'hélium donne du carbone et de l'oxygène, et l'étape suivante se passe uniquement dans les supergéantes rouges, mais cela ne concerne pas l'eau.

On peut s'amuser à chercher l'origine d'un verre d'eau, ou d'un verre de beaujolais. Le verre, pour simplifier, c'est du silicium et de l'oxygène, le beaujolais, c'est de l'eau et de l'alcool, donc de l'oxygène du carbone et de l'hydrogène ; d'où proviennent silicium, oxygène, carbone, hydrogène ? L'hydrogène vient du Big Bang, l'oxygène et le carbone viennent des géantes rouges, et le silicium vient des supergéantes rouges. Un verre de beaujolais, c'est un beau résumé de l'histoire de l'Univers (à consommer avec modération).

**CLEA.** En cours de chimie, on apprend à fabriquer de l'eau en faisant exploser un mélange de dihydrogène et de dioxygène. Mais comment l'eau s'est-elle formée dans les nuages interstellaires ?

#### Pierre Thomas

On n'a pas besoin de faire exploser un mélange de dioxygène et de dihydrogène pour faire de l'eau. Moi, par exemple, quand je mange du sucre, je l'oxyde par respiration cellulaire et cela produit du dioxyde de carbone et de l'eau que l'on évacue par les poumons. Quand on brûle du glucose, on fait de l'eau. Avec n'importe quel corps riche en hydrogène (réducteur)



mis en contact avec un corps riche en oxygène (oxydant), on fait des réactions d'oxydoréduction qui produisent de l'eau. Donc il n'y a pas qu'une façon de faire de l'eau. Et ceci à une température assez basse. Mais à partir de quelques milliers de degrés, l'eau se décompose. Un chimiste sait qu'il y a un équilibre entre  $H_2O$ ,  $H_2$  et  $O_2$  et que plus la température est élevée, plus on décompose de l'eau. Mais il faut chauffer très fort.

Dans une étoile c'est tout à fait autre chose. Dans la première génération d'étoiles post Big Bang, il n'y avait que de l'hydrogène et de l'hélium donc pas d'oxygène. Mais quand la première étoile a fabriqué de l'oxygène, cet oxygène s'est dispersé quand l'étoile est morte et a expulsé ses parties périphériques, soit gentiment (supergéante rouge, nébuleuse planétaire), soit violemment (supernova) et donc tout ce qu'avait fabriqué l'étoile a pollué l'environnement.

Et dans les déchets nucléaires qui ont pollué l'environnement, il y a l'oxygène, le carbone, le magnésium, etc. Donc au bout de la 2<sup>e</sup> ou 3<sup>e</sup> génération d'étoiles, les nébuleuses qui n'étaient pas encore devenues étoiles ont été polluées ; elles contenaient alors de l'oxygène et de l'hydrogène qui ont réagi assez facilement : l'oxygène est tellement avide de tous les réducteurs qu'il s'associe avec tout ce qui est avide d'oxygène. L'hydrogène est de loin le corps le plus abondant de l'Univers (90 % en nombre de noyaux) et en particulier des nébuleuses ; et l'oxygène est le 3<sup>e</sup> corps de l'Univers en abondance ; le 2<sup>e</sup> c'est l'hélium (9,9 % des noyaux) mais comme il ne réagit pas, on n'en parle pas), le 4<sup>e</sup> c'est le carbone, le 5<sup>e</sup> c'est l'azote, ensuite viennent le fer et le magnésium.

L'oxygène, c'est donc le deuxième corps réactif et il n'est jamais tout seul.  $O_2$  libre, c'est une monstruosité (dans l'Univers, il n'y a vraiment pas beaucoup d'endroits où il y a de l' $O_2$  libre). Donc l'oxygène se répartit en oxydant le magnésium, le silicium, le carbone, l'azote et l'hydrogène. C'est de la chimie. L'oxygène est avide de silicium et magnésium et les oxyde à 100 %. Mais il reste encore de l'oxygène. Alors il se partage entre le fer (dont il est moyennement avide), l'hydrogène (qu'il aime beaucoup), le carbone qu'il aime assez et l'azote qu'il aime beaucoup moins. C'est une histoire de chimie et ces préférences dépendent de la température. S'il y a de l'oxygène, de l'hydrogène et du carbone (avec de l'hydrogène en excès) l'oxygène se partagera entre  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ... Le carbone se partagera entre  $CO$ ,  $CO_2$ ... L'azote préfère de loin soit être tout seul ( $N_2$ ) soit se combiner avec l'hydrogène pour faire de l'ammoniac, les oxydes d'azote sont rarissimes dans l'Univers. Pour le fer, quelques pourcents seulement sont oxydés en  $FeO$  principalement. Ce qui reste est sous forme  $Fe$  ; ce  $FeO$  va s'associer à  $MgO$  et  $SiO_2$

pour former  $Si(Fe,Mg)_2O$  c'est-à-dire l'olivine, principal composant de la Terre et des météorites, ...

**CLEA** *Et comment cette eau est arrivée jusqu'à nos océans ?*

**Pierre Thomas**

Il y a 30 ou 40 ans, j'aurais dit que la Terre s'est formée par accumulation de chondrites<sup>1</sup> qui sont tombées les unes sur les autres. Les chondrites ordinaires contiennent peu d'eau (1/1 000 à 1/10 000 en masse), sauf une classe particulière de chondrites qu'on appelle les chondrites carbonées, qu'on devrait plutôt appeler les chondrites hydratées, parce qu'elles peuvent contenir jusqu'à 10 % d'eau. Le pourcentage d'eau dans les chondrites varie donc de 0,01 % à 10 %. Une chondrite de base contient à peu près 1 pour 1 000 d'eau, or la Terre contient à peu près 1 pour 1 000 d'eau. Beaucoup de gens s'imaginent que la Terre, c'est la planète océan ; c'est vrai, l'eau couvre les 5/7 de la surface, mais sur une épaisseur si faible ! Et le manteau contient à peu près autant d'eau mais diluée dans les minéraux sur 3 000 km d'épaisseur. Grosso modo, la masse de la Terre, c'est  $10^{24}$  kg et la masse d'eau c'est  $10^{21}$  kg. Donc la Terre c'est 1 pour 1 000 d'eau, à peu près comme les chondrites, en ordre de grandeur. On disait : « c'est très simple, la Terre s'est créée par rassemblement de chondrites comme la chaleur d'accrétion a tout fait fondre, il y a eu différenciation et une grande partie des corps volatils dont l'eau sont sortis et restés à la surface ».

Mais cela ne peut pas marcher parce que ce processus donne une surface très chaude, et l'eau part dans l'espace. Il faut donc imaginer un autre processus : l'eau que contenaient les briques qui ont fait la Terre a dû partir, la surface s'est refroidie, et il est donc arrivé de la « nouvelle eau » après.

Cette eau est arrivée pendant le premier milliard d'années et surtout au tout début de ce premier milliard d'années. La Terre a reçu plein de chondrites et plein de comètes. Le système solaire n'était pas stable et de nombreux événements se sont passés : par exemple Neptune, qui était situé entre Uranus et Saturne s'est baladé pour aller là où il est maintenant ; il est rentré dans la ceinture de Kuiper – la ceinture de Kuiper, ce sont des blocs de glace – et ça a créé un « bazar » pas possible et de très nombreux blocs de glace ont bombardé le système solaire interne.

Pendant environ 500 millions d'années, la Terre en a reçu plein la figure, en particulier des chondrites carbonées et des comètes c'est-à-dire des silicates hydratés venus du système solaire interne et des comètes qui sont venues du système solaire externe. On pense vraiment que l'eau est venue de ce bom-

---

<sup>1</sup> Il s'agit des météorites les plus fréquentes constituées de  $\frac{3}{4}$  de silicates,  $\frac{1}{4}$  de fer natif et d'un peu d'eau.

bardement tardif (appelé le « vernis tardif »).

Il y a d'autres indices de ce bombardement tardif. Prenons un métal assez rare, le nickel par exemple. Il est extrait actuellement de roches du manteau, les péridotites, qui contiennent entre 0,1 et 0,01 % de nickel. Celui-ci est très avide de fer. Si on prend une terre de chimie chondritique, et qu'on la fond pour faire le noyau, le fer tombant pour former ce noyau va emmener tout le nickel avec lui. Donc le manteau aujourd'hui devrait être dépourvu de nickel. Or il en contient 0,1 % ce qui est beaucoup. Donc le nickel contenu aujourd'hui dans le manteau de la Terre a dû arriver après que la Terre a fondu et s'est différenciée. Là encore, on fait appel à ce qu'on appelle le vernis tardif. Et le vernis tardif aurait amené beaucoup d'éléments : l'or, le platine, tous les éléments sidérophiles (aimant le fer) qu'on extrait, et l'eau. Et une partie des molécules organiques aussi d'ailleurs. Le grand débat, c'est : est-ce que cela vient du système solaire interne (astéroïdes) ou du système solaire externe (comètes) ?

Pour trancher, il faut mesurer les rapports isotopiques. L'eau de la Terre a un rapport D/H (deutérium/hydrogène) de l'ordre de  $1,56 \times 10^{-4}$ . On s'est aperçu que les météorites avaient un rapport D/H assez semblable. Jusqu'à il y a 5 ou 6 ans, on avait analysé 8 comètes qui venaient du nuage de Oort par des méthodes spectrales ou directes (comète de Halley, Giotto 1986) et le rapport était plus grand.

Donc les astéroïdes ont un rapport D/H comme celui de la Terre et les comètes dont le rapport était connu à l'époque avaient un rapport plus grand que celui de la Terre ; on disait donc : « c'est très simple l'eau de la Terre est venue des astéroïdes »

Il y a quelques années, on a analysé deux nouvelles comètes, qui provenaient de la ceinture de Kuiper et, qui avaient un rapport D/H voisin de celui de la Terre en particulier Hartley 2. On avait donc deux comètes à rapport D/H voisin de celui de la Terre et 8 à rapport élevé.

On généralisait abusivement en pensant que les comètes à rapport élevé, de l'ordre de  $3 \times 10^{-4}$ , devaient provenir du nuage de Oort et que pour celles à rapport de l'ordre de  $1,5 \times 10^{-4}$  c'était la ceinture de Kuiper.

C'était très bien jusqu'à il y a quelques semaines parce qu'on vient de mesurer le rapport D/H de la comète Tchourioumov-Guérassimenko, qui est une comète de la famille de Jupiter donc provenant de la ceinture de Kuiper, et qui a un rapport encore plus élevé, donc qui contient plus de deutérium que les comètes provenant du nuage de Oort. Ça montre que le deutérium dans les comètes est mal compris.

Il y a donc maintenant 11 comètes dont on connaît le rapport D/H : 8 dont le rapport est  $3 \times 10^{-4}$ , 2 dont le rapport est  $1,5 \times 10^{-4}$  et 1 dont le rapport est  $5,3 \times 10^{-4} \pm 0,7$ .

Le doute subsiste. D'ailleurs ce n'est pas forcément l'un ou l'autre, ça peut être l'un et l'autre surtout que beaucoup de gens pensent que certaines chondrites carbonées seraient des noyaux de comètes presque totalement déshydratés.

**CLEA.** *Pourquoi ce rapport D/H n'est-il pas toujours le même ?*

**Pierre Thomas**

Pourquoi serait-il le même ? La nature sépare les isotopes. Ce n'est qu'en simplifiant abusivement que l'on peut dire que les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques. Parce que ça n'est évidemment pas vrai. Sinon, on ne saurait pas faire de l'eau lourde. Comment les Allemands fabriquaient-ils l'eau lourde (HDO) pour essayer de faire leur bombe atomique ? Il y a un film sur le sujet, « la bataille de l'eau lourde » qui se passe en Norvège. Pourquoi là-bas ? Parce qu'ils avaient beaucoup d'électricité pas chère à cause des centrales électriques et que, pour faire de l'eau lourde, on fait bêtement l'électrolyse de l'eau.

Les ions  $D^+$  bougent un tout petit peu moins vite que les ions  $H^+$  et quand on prend un million de litres d'eau et qu'on électrolyse, le dernier litre qui reste quand on a presque tout électrolysé, ça n'est quasiment que de l'eau lourde. Il n'y a plus qu'à électrolyser ce dernier litre pour avoir du deutérium pur. À chaque fois que l'on fait de l'évaporation de l'eau, l'eau légère part plus vite que l'eau lourde. Dans le système solaire, l'hydrogène de Mars est plus lourd que l'hydrogène de la Terre (il contient plus d'isotope D) parce que Mars a perdu beaucoup plus d'hydrogène  $^1H$  que la Terre du fait de sa gravité plus faible donc comme elle perd plus d'hydrogène  $^1H$ , il y a un tri et ce qui reste est plus lourd D. Quand on voit un tableau périodique des éléments avec un rapport isotopique, on oublie de dire où il est mesuré. Par exemple, pour le carbone, la vie sépare les isotopes légers des isotopes lourds et il y a quelques fractions pour mille de plus d'isotopes de carbone 12 que de carbone 13 dans le monde vivant que dans le monde inerte.

Les géologues prennent toujours des standards. Pour l'eau c'est l'eau de mer, pour le carbone, c'est une espèce de roche étalon qu'on appelle le standard : c'est un fossile de bélemnite aux États-Unis...

Vous trouverez des compléments sur le site Planet-terre (en particulier le rapport D/H de différents objets sur la figure 9).

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/Rosetta-Chury-Science-janvier-2015.xml>

# ARTICLE DE FOND

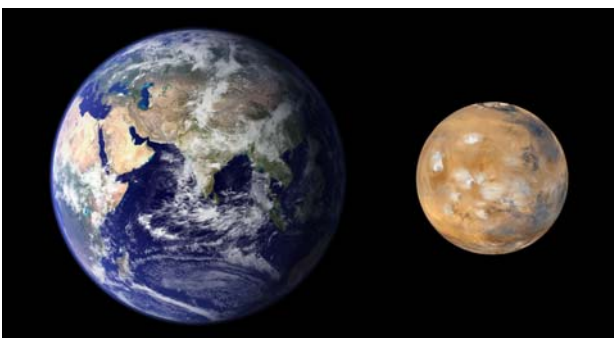
## Le cycle actuel de l'eau sur Mars

**Thomas Appéré**, enseignant de physique-chimie au lycée St Paul (Vannes), docteur en planétologie et chercheur affilié à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

*Mars a beaucoup de points communs avec la Terre : des saisons, des calottes polaires, de l'eau... Thomas Appéré, qui a soutenu sa thèse sur ce sujet nous présente l'état actuel de l'eau sur Mars.*

Lorsque pour la première fois des astronautes ont contemplé la Terre depuis l'espace, ils l'ont surnommée la « planète bleue » : 70 % de sa surface est recouverte par des océans. L'hydrosphère terrestre comprend également les glaciers et calottes polaires, les fleuves et étendues d'eau continentales et souterraines ainsi que les nuages et la vapeur d'eau atmosphérique. Le parcours de l'eau entre ces réservoirs gazeux, liquide et solide se nomme le cycle de l'eau. L'énergie solaire est le moteur principal de ce cycle car il permet l'évaporation de l'eau liquide en vapeur d'eau, entraînant tous les autres échanges.

Mars, au contraire, est une planète désertique et très aride, où il règne une température de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  en moyenne. L'eau en surface n'est stable qu'à l'état solide et uniquement dans les régions polaires ; on y trouve des calottes, réservoirs de glace d'eau de 3 kilomètres d'épaisseur et de 1 000 kilomètres de diamètre. Pourtant, les terrains les plus anciens de Mars portent les traces de la présence d'eau liquide dans un lointain passé : vallées fluviales asséchées, sédiments lacustres, deltas, minéraux issus de l'altération du sol par de l'eau liquide. L'intérieur des calottes polaires est un millefeuille de glace et de poussière, témoin de variations climatiques importantes dans un passé plus récent.



**Fig.1.** La Terre et Mars représentées à la même échelle. (Crédits : gauche : NASA; droite : NASA/JPL-Caltech/MSSS).

Comprendre comment l'hydrosphère martienne a évolué pour aboutir à son état actuel est au centre des problématiques scientifiques concernant la

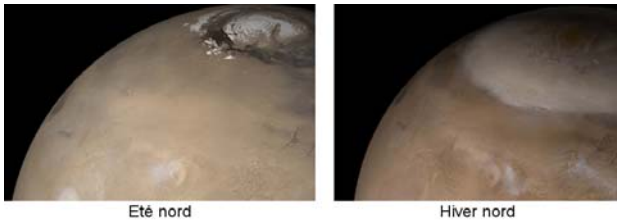
planète rouge. Cette question oriente très largement les programmes d'exploration des différentes agences spatiales. L'étude du climat actuel de Mars a pour objectif une meilleure compréhension de ses climats passés.

### Le climat actuel de Mars

Un astronaute arrivant sur Mars ne serait pas trop dépaysé : le paysage ressemble à s'y méprendre au désert du Colorado, à l'exception de la couleur orangée du ciel due à la présence permanente de poussière en suspension. Certes, il ne devra pas quitter sa combinaison : l'atmosphère martienne est essentiellement composée de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et la pression de l'air est 100 fois plus faible que sur Terre. Mais la durée du jour est quasiment la même (24 heures et 40 minutes) et l'année martienne, longue de 669 jours martiens (sols), est découpée en quatre saisons. Si l'après-midi aux tropiques, la température peut monter à  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , elle chute dès la nuit suivante jusqu'à  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En fait, le sol martien, sec et granuleux, ne retient pas efficacement la chaleur. Son inertie thermique est très faible comparée à la Terre et à ses océans. Les variations thermiques entre le jour et la nuit sont amplifiées par la finesse de l'atmosphère. Ainsi, le climat martien est qualifié d'« hypercontinental ».

### Le cycle saisonnier du $\text{CO}_2$

Alors que sur Terre seule la vapeur d'eau peut se transformer en glace, les conditions martiennes de pression et de température permettent à la fois au dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et à l'eau  $\text{H}_2\text{O}$  de passer de l'état gazeux à l'état solide. Ainsi, lorsque la température baisse en automne et en hiver, le  $\text{CO}_2$  atmosphérique se condense à la surface en un manteau de neige et de glace carbonique allant du pôle jusqu'à environ  $50^{\circ}$  de latitude (voir figure 2). Au printemps, l'augmentation de l'ensoleillement permet la sublimation de la glace carbonique, c'est-à-dire son passage direct de l'état solide à l'état gazeux : le  $\text{CO}_2$  solide retourne dans l'atmosphère.



**Fig.2.** La calotte polaire nord de Mars, composée de glace d'eau, se recouvre en automne et en hiver d'un manteau brillant de glace carbonique. Sur l'image de droite, on parvient à distinguer la calotte polaire nord à travers la glace saisonnière (Crédits : NASA/JPL-Caltech /MSSS).

L'extension puis le retrait de cette couverture de glace carbonique, alternativement dans les hémisphères nord et sud, constitue l'aspect le plus visible du cycle saisonnier martien. De fait, il a été observé dès 1784 par l'astronome d'origine allemande William Herschel. Il décrit minutieusement les variations saisonnières de ces dépôts brillants et supposa qu'ils étaient composés de neige et de glace d'eau. Il fallut attendre les années 1960 pour comprendre la nature exacte des glaces saisonnières martiennes, à savoir de la glace de CO<sub>2</sub> et non de la glace d'eau. Les mesures effectuées en 1965 par la sonde Mariner 4 permirent d'abord d'identifier le dioxyde de carbone comme le principal composant de l'atmosphère martienne.

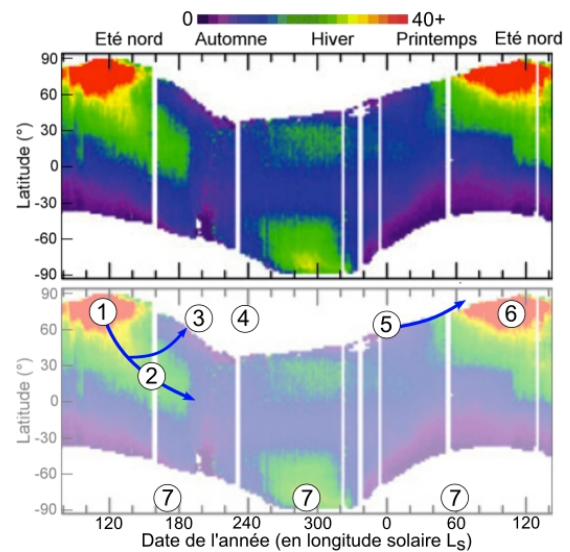
Puis la sonde Mariner 7 mesura la température des glaces saisonnières, -125 °C, la température de la glace de CO<sub>2</sub> en équilibre avec son gaz à la pression atmosphérique martienne.

Dans les années 1970, les atterrisseurs Viking 1 et 2 révélèrent que la pression de l'air varie périodiquement en fonction des saisons, ces variations atteignant 30 % (contre 5 % sur Terre). Elles témoignent du cycle de condensation/sublimation de l'atmosphère de CO<sub>2</sub> alternativement dans l'hémisphère nord puis l'hémisphère sud. Ce phénomène engendre un flux de CO<sub>2</sub> entre les deux hémisphères, qui contribue significativement à la circulation atmosphérique martienne. C'est un processus sans équivalent sur Terre mais on le retrouve sur Triton, le plus gros satellite de Neptune, où l'atmosphère de diazote N<sub>2</sub> se condense à la surface puis se sublime en fonction des saisons. Le même processus se déroule probablement sur Pluton ; nous en aurons confirmation le 14 juillet prochain, lorsque la sonde New Horizons survolera la planète naine.

## Le cycle saisonnier de H<sub>2</sub>O

Bien que la vapeur d'eau ne soit présente qu'à l'état de traces dans l'atmosphère martienne, elle est au cœur d'un véritable cycle saisonnier. La figure 3 montre le contenu en vapeur d'eau dans

l'atmosphère de Mars en fonction de la latitude et de la date. On constate de fortes variations selon le lieu et la saison.



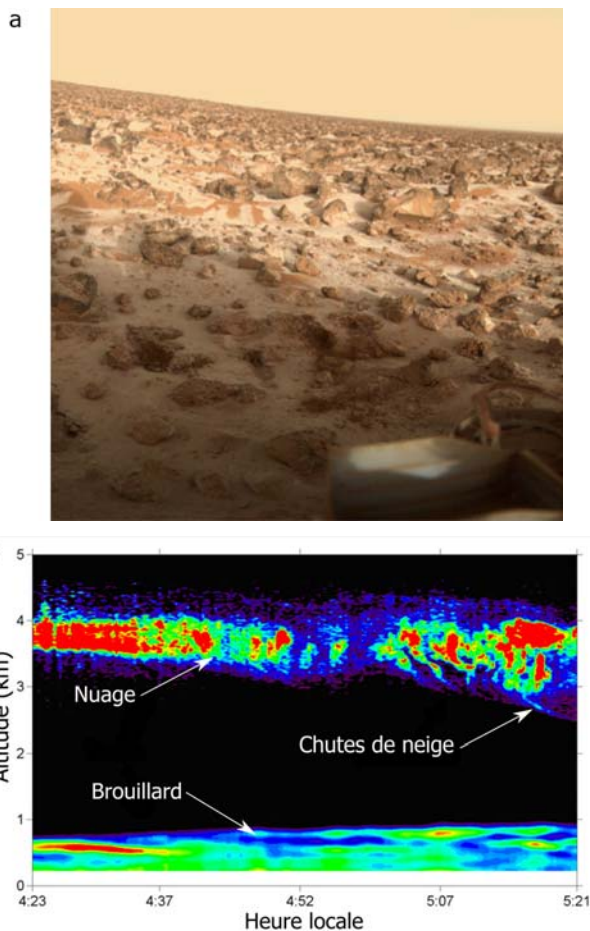
**Fig.3.** Quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère de Mars mesurée par le spectromètre TES à bord de la sonde Mars Global Surveyor. La quantité de vapeur d'eau est représentée en fonction de la latitude et de la date et exprimée en micromètres précipitables (épaisseur de la couche d'eau formée si toute l'eau de l'atmosphère précipitait à la surface). Chaque bande verticale de mesures correspond à une moyenne sur toutes les longitudes à un instant donné. Les zones blanches indiquent l'absence de mesures, généralement lorsque la surface est recouverte par les dépôts saisonniers de glace carbonique (d'après Smith, 2008).

Tout commence en été au pôle Nord (fig. 3 point 1). La calotte polaire nord, immense glacier composé d'eau et de poussières, est chauffée par les rayons du Soleil. Cela entraîne la sublimation de la surface glacée en vapeur d'eau. Ainsi, chaque été, la région polaire nord devient pour quelques mois une source de vapeur d'eau que la circulation atmosphérique entraîne vers les basses latitudes (fig. 3 point 2). La quantité d'eau impliquée est faible : si on précipitait à la surface toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère martienne, on obtiendrait une couche d'eau de 75 micromètres tout au plus. Malgré la faible teneur en eau dans l'atmosphère, la saturation est vite atteinte du fait des basses températures : il se forme des nuages. On en observe toute une variété : une ceinture de nuages à l'équateur, près des grands volcans martiens, des brumes nocturnes et matinales au fond des canyons et d'épais nuages troposphériques aux hautes latitudes.

En automne, lorsque la température de la surface diminue progressivement, du givre d'eau se condense sur la calotte polaire nord et se sublime pendant la journée. Puis lorsque le Soleil est suffisamment bas sur l'horizon, le givre d'eau persiste toute la journée et s'étend aux plaines alentours (fig. 3 point 3). Les atterrisseurs Viking 2



et Phœnix, posés respectivement par 48° et 68° de latitude nord, ont été les témoins privilégiés de la formation de ce givre (voir fig. 4 a). Son épaisseur a été estimée entre 10 micromètres au Soleil et 200 micromètres à l'ombre des rochers. Une partie de ce givre se diffuse dans les premières couches de la surface : une fine couche de sol gelé pourrait alors se former, la glace liant les grains du sol entre eux.



**Fig.4. a.** Le site d'atterrissage de Viking 2 recouvert d'une fine couche de givre d'eau en hiver (crédit : NASA/JPL). **b.** Mesures effectuées par le lidar de l'atterrisseur Phœnix : un rayon laser est émis vers le ciel, se réfléchit sur les particules de glace d'eau en suspension et est capté à son retour par la sonde. Les couleurs indiquent la densité de particules, du violet au rouge. Ces mesures montrent la présence de nuages, de brouillard près du sol et de chutes de neige (d'après Daerden et al., 2010).

La condensation de ce givre d'eau s'accompagne de la formation de brouillard dans les premières centaines de mètres au-dessus de la surface. Une couche de nuages surplombe ce brouillard et donne lieu à la précipitation de cristaux de glace d'eau de quelques dizaines de micromètres de diamètre, similaires aux cristaux composant les cirrus terrestres (voir figure 4 b).

Lorsque l'hiver arrive, la température de la surface descend sous le point de condensation du CO<sub>2</sub>, aux

alentours de -125 °C<sup>1</sup>. La glace de CO<sub>2</sub> se condense alors à la surface selon un cycle journalier de condensation et de sublimation (figure 3 point 4), piégeant de la glace d'eau et des poussières en faibles proportions (quelques dix-millièmes de fraction massique). Dans les régions plongées dans la nuit polaire, la condensation du CO<sub>2</sub> est continue et produit une couche de glace carbonique atteignant 1 mètre d'épaisseur au pôle, voire 2 mètres localement. L'épaisseur de ce manteau glacé décroît avec la latitude jusqu'à la limite de condensation du CO<sub>2</sub> vers 50° de latitude nord. C'est la condensation de cette énorme masse de glace de CO<sub>2</sub> (jusqu'à 6 000 milliards de tonnes !) qui conduit à l'effondrement périodique de la pression atmosphérique martienne.

Puisque sur Mars, la température de condensation de la glace de H<sub>2</sub>O est supérieure à celle de la glace de CO<sub>2</sub>, la glace d'eau peut s'étendre à plus basse latitude que la glace carbonique. Ainsi, un anneau composé d'une fine couche de givre d'eau entoure les dépôts saisonniers riches en CO<sub>2</sub>, jusqu'à 44° de latitude nord<sup>2</sup>. Le site d'atterrissage de Viking 2 est compris dans cet anneau car la sonde n'a pas pu observer la formation de glace carbonique à la surface.

Lorsque le Soleil refait son apparition au printemps, les glaces saisonnières de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O se subliment (figure 3 point 5). L'anneau de glace d'eau suit la limite des condensats de glace carbonique lors de leur recul. La sublimation de la glace d'eau contenue dans cet anneau est la principale source de vapeur d'eau dans l'atmosphère au printemps. Une partie de cette vapeur d'eau est entraînée vers le nord par la circulation atmosphérique et se recondense sur le manteau de glace carbonique. Par étapes successives de sublimation, transport atmosphérique et recondensation, la glace d'eau saisonnière rejoint ainsi la calotte permanente nord. Lorsqu'à la fin du printemps, toute la glace saisonnière de CO<sub>2</sub> s'est sublimée de la calotte, celle-ci se réchauffe, se sublime et injecte à nouveau une importante quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère (figure 3 point 6). Le cycle de l'eau est bouclé... ou presque ! Car la question

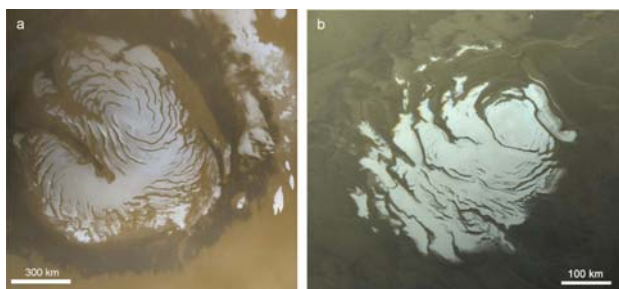
<sup>1</sup> Sur Mars, la glace de H<sub>2</sub>O se forme lorsque la température atteint environ -70 °C alors qu'il faut que la température descende à -125 °C pour que la glace de CO<sub>2</sub> se condense.

<sup>2</sup> Les glaces de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O sont toutes les deux blanches dans le domaine visible du spectre électromagnétique : il n'est pas possible de les distinguer à ces longueurs d'onde. Ce sont les mesures effectuées dans l'infrarouge proche par le spectromètre imageur OMEGA (Mars Express) qui ont permis de faire la distinction et de confirmer la présence de cet anneau de glace d'eau.

essentielle pour comprendre l'impact climatique de ce cycle est de quantifier les échanges nets entre les différents réservoirs d'eau : calottes polaires, glaces saisonnières, vapeur d'eau atmosphérique, nuages, sous-sol gelé et poussières minérales hydratées en surface. En particulier, le bilan annuel des calottes polaires nord et sud est-il positif ou non, c'est-à-dire ces calottes sont en accumulation ou en ablation ? La réponse tient à une fraction de millimètres d'épaisseur par an, extrêmement difficile à mesurer directement à l'échelle des missions spatiales. Cependant, ce bilan est primordial pour comprendre comment les calottes polaires de Mars se sont formées au cours de cycles climatiques de centaines de milliers à plusieurs millions d'années.

## Les calottes polaires de Mars

À l'image de l'Antarctique et du Groenland, les calottes polaires martiennes sont le résultat de l'accumulation de glace d'eau déposée chaque année au cours des temps géologiques (voir figure 5). Ces calottes sont dites permanentes, par opposition aux dépôts saisonniers décrits précédemment. Les sondages radar effectués par l'instrument MARSIS à bord de Mars Express ont permis d'estimer l'épaisseur et l'étendue de ces édifices glaciaires. La calotte permanente nord a une épaisseur maximale de 3 kilomètres, un diamètre de l'ordre de 1 000 kilomètres et est âgée de quelques centaines de milliers d'années. La calotte permanente sud est beaucoup plus âgée, environ 10 millions d'années. Son épaisseur et sa superficie sont comparables à celles de son homologue nord. L'intérieur des calottes polaires est une succession de couches de glace d'eau plus ou moins riches en poussières, ce qui en fait de précieuses archives climatiques. Ces couches peuvent être observées directement le long des vallées qui entaillent les calottes mais aussi grâce aux ondes radar.



**Fig.5.a.** La calotte permanente nord de Mars, d'un diamètre d'environ 1000 kilomètres. **b.** : La calotte permanente sud a un diamètre équivalent mais la moitié est recouverte par de la poussière (Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS).

Si les calottes permanentes nord et sud sont finalement assez similaires, la calotte sud a toutefois une

particularité : sa surface est recouverte d'une couche résiduelle de glace de CO<sub>2</sub> pure d'une dizaine de mètres d'épaisseur, présente tout au long de l'année martienne. Cette couche est percée par une multitude de dépressions circulaires dont le fond laisse apparaître la calotte résiduelle de glace d'eau (voir figure 6). On a donné le nom de « fromage suisse » à cette texture si particulière. Chaque année, les trous s'agrandissent comme un bon fromage affiné en cave !



**Fig.6.** La texture en « fromage suisse » de la calotte permanente sud photographiée par la caméra HiRISE à bord de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. La couche résiduelle de glace carbonique correspond au terrain relativement lisse. La glace d'eau affleure au fond des dépressions (Crédits : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona).

Pourquoi cette couche résiduelle de glace de CO<sub>2</sub> n'est-elle présente qu'au sud ? Parce que l'excentricité actuelle de l'orbite martienne induit un hiver plus long dans l'hémisphère sud, permettant à une quantité plus grande de glace carbonique de s'y déposer. L'été austral est plus chaud que l'été boréal mais également plus court, si bien que la glace de CO<sub>2</sub> parvient à persister toute l'année.

Cette couche résiduelle de glace carbonique joue un rôle particulièrement important dans le cycle actuel de l'eau sur Mars. En effet, sa température y est constamment maintenue à -125 °C, été comme hiver. Elle constitue donc un piège glacé pour la vapeur d'eau et assèche l'hémisphère sud, deux fois plus sec que l'hémisphère nord (voir fig. 3 point 7). Sur le long terme, le cycle de l'eau sur Mars semble donc se résumer à un transport unidirectionnel d'eau de la calotte polaire nord à la calotte polaire sud. Une telle dynamique n'a pu exister tout au long de l'histoire martienne, car la réserve d'eau du pôle Nord serait déjà épuisée. Il est donc fort probable que, par le passé, le cycle a fonctionné en sens inverse. D'ailleurs, des calculs prévoient que l'excentricité de l'orbite martienne fluctue périodiquement tous les 25 000 ans environ. On peut donc envisager qu'il y a quelques dizaines de milliers d'années, la situation était inverse : une calotte polaire boréale recouverte d'une couche résiduelle de glace carbonique et une calotte australe source de vapeur d'eau.

## De l'eau en surface et en sous-sol

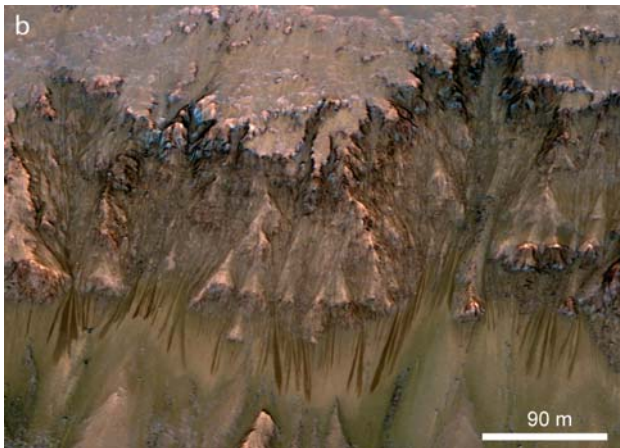
Il existe d'autres réservoirs d'eau sur Mars. L'eau peut être adsorbée sur certains minéraux, c'est-à-dire que des molécules d'eau sont collées à leur surface. Ces molécules participent au cycle de l'eau par des échanges entre la surface et l'atmosphère.

De plus, de la glace d'eau est présente en abondance dans le sous-sol de Mars aux hautes et moyennes latitudes. L'atterrisseur Phœnix a confirmé la présence de ce pergélisol en découvrant de la glace d'eau quasiment pure sous quelques centimètres de sable (figure 7 a). Les instruments radar ont montré que le pergélisol s'étend sur au moins 60 mètres sous la surface et descend jusqu'à 45° de latitude dans l'hémisphère nord. Ce réservoir pourrait contribuer de façon secondaire au cycle de l'eau.



**Fig.7. a** Une tranchée creusée par Phœnix a révélé la présence de glace d'eau quasiment pure sous environ 7 cm de sable.

**b** Ces intrigantes traînées sombres sur le rempart du cratère Newton seraient dues à l'écoulement d'eau liquide très salée (Crédits : NASA/JPL-Caltech /University of Arizona).



On a également observé récemment des écoulements sombres sur des pentes chauffées par le Soleil en été, où la température peut atteindre 27 °C (figure 7 b). A l'heure actuelle, le meilleur candidat pour expliquer ce phénomène est un écoulement d'eau très salée : une saumure de sulfate de fer ou de perchlorate de calcium. Une telle solution peut rester liquide jusqu'aux alentours de -68 °C avant de s'évaporer. Mars n'a pas fini de nous surprendre !

## Variations climatiques

Le cycle de l'eau et plus généralement le climat martien ont été très différents dans le passé. En effet, les géologues ont découvert les empreintes laissées par d'immenses glaciers jusque sous les tropiques, sur les flancs ouest des grands volcans martiens tel Olympus Mons. Parfois la glace paraît avoir disparu, mais des traces de raclage comparables à celles observées au fond des anciennes vallées glaciaires terrestres suggèrent que la surface a été érodée par le fluage d'une couche de glace d'environ un kilomètre d'épaisseur. Dans d'autres régions, la glace est encore présente sous une épaisse couche isolante de sédiments qui stopperait sa sublimation. Mars a donc connu des ères glaciaires il y a quelques dizaines de millions d'années.

Comment des glaciers ont-ils pu se former dans des régions aussi arides ? Les cycles astronomiques, et notamment celui de l'obliquité, semblent être responsables de ces changements drastiques du climat martien. L'obliquité est l'inclinaison de l'axe de rotation d'une planète avec le plan de son orbite. Les oscillations de l'obliquité terrestre sont minimes car notre planète est stabilisée par la Lune. Pourtant, elles ont joué un rôle important dans l'apparition des périodes glaciaires. Concernant Mars, des calculs ont montré que son obliquité oscille de manière chaotique, atteignant jusqu'à 60° ! Lorsque l'obliquité est supérieure à 40°, l'insolation dans les régions polaires est plus forte aux pôles qu'à l'équateur et les glaces sont plus stables dans les zones froides équatoriales. Le chauffage de la calotte polaire nord libère de grandes quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère, induisant un cycle de l'eau plus actif que celui qu'on observe aujourd'hui. La couverture nuageuse augmente considérablement tandis que la neige et la glace s'accumulent à l'équateur, formant des glaciers. Ces édifices glaciaires, recouverts d'une importante couche de poussière protectrice, ont pu persister jusqu'à aujourd'hui.

Dans un passé plus lointain, il y a plus de trois milliards d'années, l'eau liquide était abondante à la surface de Mars. Comme l'a révélé récemment le rover Curiosity, la planète Mars était habitable à cette époque reculée, c'est-à-dire qu'elle réunissait les conditions environnementales pour permettre à une activité biologique de se développer. Ces conditions étaient-elles intermittentes ou bien stables ? Ont-elles permis à la vie d'apparaître ? Si oui, la vie a-t-elle pu se maintenir jusqu'à aujourd'hui ? Autant de questions qui restent en suspens et n'en rendent Mars que plus passionnante.



# AVEC NOS ÉLÈVES

## L'eau et la vie ailleurs

Olivier Gayraud, Toulouse

*Le travail présenté ici a été le point de départ d'un projet Comenius (établissements danois, allemand, turc et français) à Millau en 2009. Le thème fédérateur était « L'eau, une richesse à partager ». 2009 était aussi année mondiale de l'astronomie, d'où mon idée de rassembler ces deux thèmes dans un même itinéraire de découverte proposé aux élèves de cinquième.*

### Le projet

La production finale est un dépliant publicitaire vantant une planète imaginaire où coule de l'eau. Les élèves ont été accompagnés par une enseignante de français, et par moi-même. Les thèmes abordés en classe de sciences physiques sont « L'eau dans notre environnement », et plus particulièrement « Système solaire et Univers ».

### Botte de foin cosmique

Pour faire émerger les premières questions, et pousser les élèves à la curiosité, nous-nous sommes interrogés sur l'existence des extra-terrestres. Pour cela, j'ai utilisé le dossier « *La vie ailleurs ? 12 experts débattent* » d'août 2007 de Ciel et Espace. Ci-dessous, 2 des 7 questions posées à Hubert Reeves et quelques réponses d'élèves retravaillées.

#### 1. Envisagez-vous sérieusement une visite d'extra-terrestres ?

Non, ils n'existent pas, sinon on les aurait déjà vus.  
Non, on pense qu'ils n'existent pas car on n'a jamais eu de preuve qu'ils existaient.  
Non, les conditions de vie sur la Terre ne conviendraient pas à un extra-terrestre, parce que le climat et la température ne sont sûrement pas les mêmes entre notre planète et la leur.  
Oui, mais je ne sais pas où ils habitent.

#### 2. À votre avis, pour quelles raisons ne sont-ils pas venus jusqu'à nous ?

Parce qu'ils ne veulent pas cohabiter.  
Car ils ont peur d'être mal accueillis.  
Parce qu'ils trouvent notre planète peu évoluée, donc ils ne sont pas intéressés.  
Ils sont peut-être venus sans qu'on le sache.  
Cela dépend de leur technologie pour accéder à la Terre.

Si dans un premier temps le « non » remporte un large suffrage, les élèves, parce qu'ils sont obligés de répondre à la seconde question, finissent par

entrevoir qu'une absence de preuve n'est pas la preuve de leur absence.

La fin de la séance est occupée par la mise en commun de tous les groupes : les débats vont bon train. Après lecture des réponses d'Hubert Reeves, les élèves sont plutôt satisfaits de se découvrir « aussi ignorant » qu'un véritable astrophysicien, et motivés pour poursuivre leur recherche.

Finalement, il a été convenu d'écrire sur le carnet de bord des élèves : nous-nous sommes interrogés sur l'existence des E.T., et avons conclu ne pas pouvoir donner de réponses. Mais, nous avons retenu que pour chercher la vie ailleurs, il fallait rechercher de l'eau.

### Dessine-moi une planète

Cette deuxième séquence est destinée à l'acquisition du vocabulaire scientifique essentiel à la description d'une planète. CDI, internet et films<sup>4</sup> sont mis à contribution. Ces connaissances sont réinvesties dans des articles, saisis à l'ordinateur, où les élèves n'hésitent pas à se donner un rôle, comme dans l'exemple suivant.

#### HERA

Histoire. La planète Héra se nomme ainsi car c'est la première planète où la vie est possible. Elle fut découverte dans la constellation d'Orion par l'astrophysicienne Pons Marie à l'observatoire de Toulouse.

Caractéristiques. C'est une planète tellurique. Elle est bleue turquoise et possède deux satellites : HD 050108 Aa, et Ab (Phoenix, et Aqua). Elle possède une atmosphère (70 % d'azote, 20 % d'oxygène et 0,035 % de dioxyde de carbone et de nombreux autres gaz).

<sup>4</sup> Collection Galilée : limite de recherche-la vie ailleurs-CNDP, La Cinquième, 2000 ; A. Brack, M. Maurette et J. Heidmann



**Données numériques.** La pression est de 2026 hPa, la pesanteur de 9,9 N/kg, sa durée de rotation de 25 heures, et de révolution 370 jours. Son diamètre est de 48 890 km, la température est de  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $42^{\circ}\text{C}$ . Son étoile Soléra, relativement petite et froide ( $4\,000^{\circ}\text{C}$ ) est distante de 56 120 560 km. Phoenix est recouvert de volcans en activité dont Zeus qui est le plus grand, et Aqua est recouverte de glace d'eau.

## Bouteilles à la mer céleste

Pour mieux fixer dans l'espace ces planètes imaginaires, nous avons chacun construit un "cherche étoile", et recherché la distance nous séparant de quelques-unes d'entre-elles. La notion d'année de lumière étant définie, nous avons compris à quel point il serait difficile de communiquer avec une vie extra-terrestre : les temps de réponses sont ... astronomiques ! Fort de ce constat, nous avons réfléchi à la teneur d'un message à envoyer en direction d'une hypothétique vie extra-terrestre.

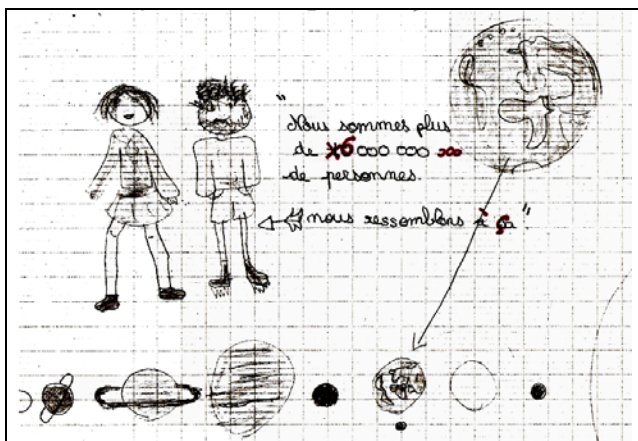


Fig. 1 message à envoyer.

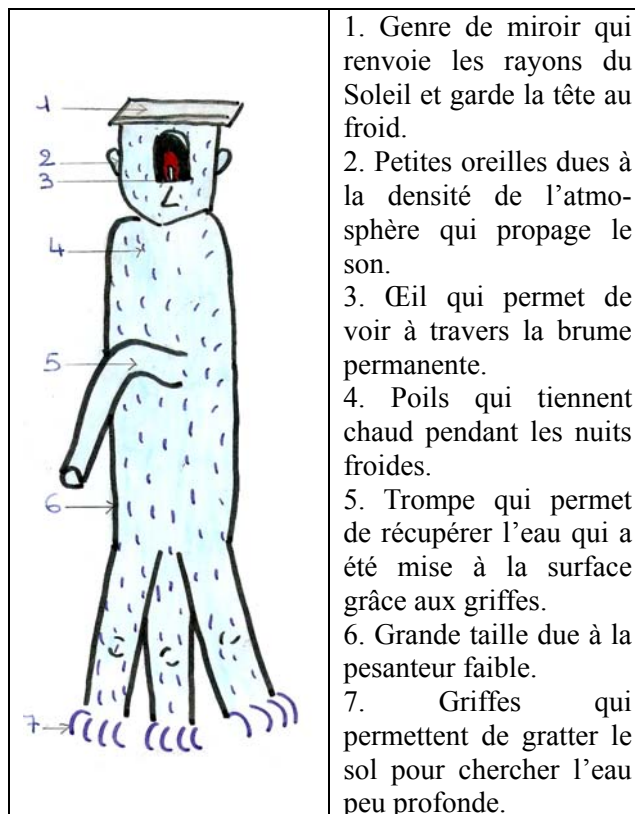
Les moyens inventés par les élèves sont : graver un dessin sur une fusée (figure 1), adresser le même message en plusieurs langues pour avoir une chance d'être compris, un laser envoyant des signaux en morse, une vidéo de l'histoire de la Terre envoyée dans l'espace...

Prenons le temps d'indiquer ici qu'il ne s'agit que de discours pacifiques. De nouveau, les élèves sont agréablement surpris de découvrir que leurs idées ont déjà été réalisées<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Message radio d'Arecibo, message gravé sur Pioneer 10, vidéo-disque embarqué par les sondes Voyager...

## Ailleurs visité d'ici

Appuyons nous sur la citation de Fontenelle : « Il faudrait concevoir que les planètes auraient été faites pour n'être point habitées [...] et qu'il y aurait une exception en faveur de la Terre toute seule. Qui voudra le croire, le croie ; pour moi, je ne m'y puis pas résoudre »<sup>6</sup>. J'ai alors proposé aux élèves de dessiner l'extra-terrestre vivant sur leur planète imaginaire. Ils devaient expliquer les raisons physiques des différents caractères anatomiques représentés (figure 2).



1. Genre de miroir qui renvoie les rayons du Soleil et garde la tête au froid.
2. Petites oreilles dues à la densité de l'atmosphère qui propage le son.
3. Œil qui permet de voir à travers la brume permanente.
4. Poils qui tiennent chaud pendant les nuits froides.
5. Trompe qui permet de récupérer l'eau qui a été mise à la surface grâce aux griffes.
6. Grande taille due à la pesanteur faible.
7. Griffes qui permettent de gratter le sol pour chercher l'eau peu profonde.

Fig.2. habitant de la planète Aqualive.

## Travaux finaux

Les dépliants publicitaires ont été montés, plastifiés, et exposés à l'office du tourisme millavois, entre autres travaux sur l'eau. En exemple, le verso de la plaquette de la planète Fuego, dont est extrait le calligramme suivant (figure 3) : « L'onde transparente, coulant du torrent crépitant, effleure mon corps sous mon regard. Sur Fuego, l'espoir de marcher sur l'eau est devenu une évidence. L'eau de pluie fait un bruit cristallin sur le lagon turquoise. Ma vue s'embrase en voyant le faisceau lumineux de la Lune se reflétant sur les flots azurs ».

<sup>6</sup> Entretiens sur la pluralité des mondes, 1686.

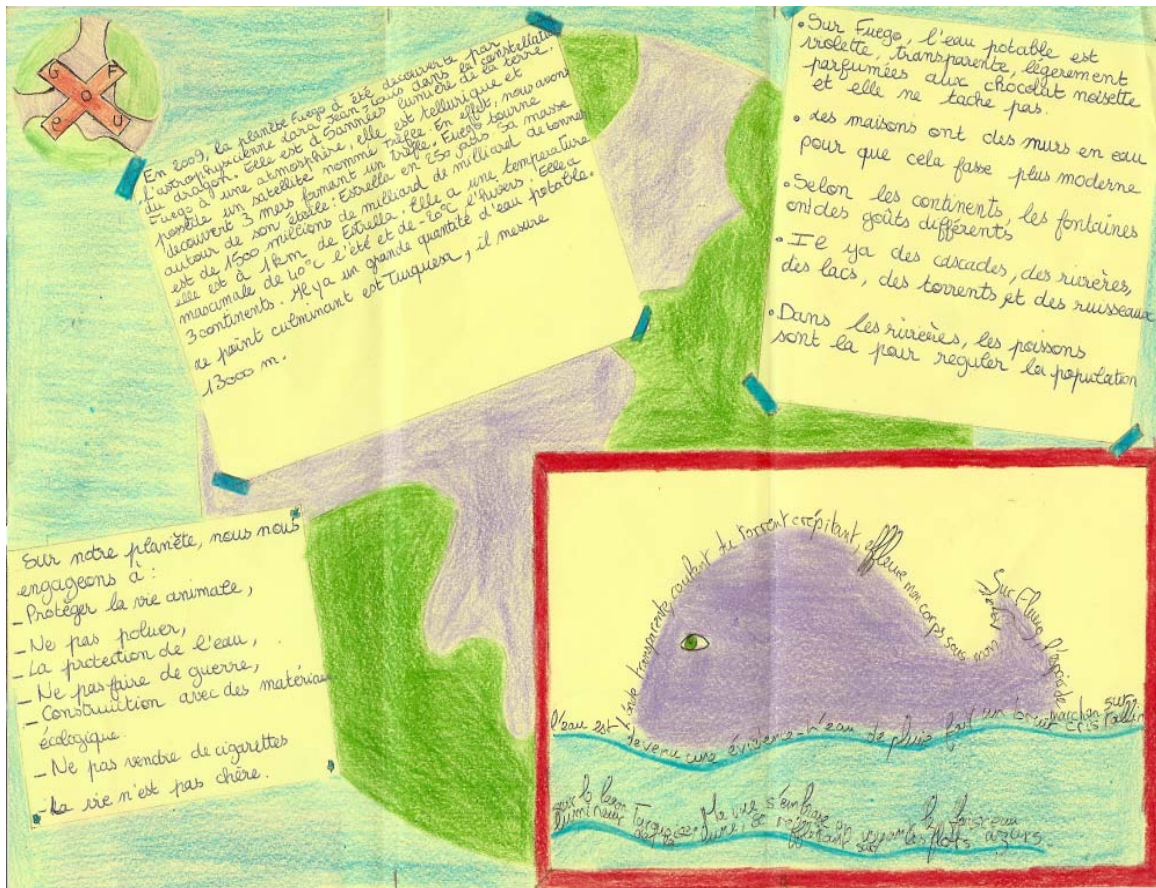


Fig.3. planète Fuego, caractéristiques, habitant et engagements politiques.

## Mots croisés, l'eau

### Horizontalement

1. Pour une planète, cela se résume en général à la possibilité d'eau liquide.
2. Sous l'eau. Douceur pour ceux qui n'aiment pas l'eau.
3. Passé. Forme d'eau.
4. Assemblées.
5. Oublié. Quart de quotient. Mètre cube mais pas pour l'eau.
6. Changement d'état de l'eau. Constituant de l'eau.
7. Prénom allemand. Axe. Ce Cassini-là est connu pour sa carte de France.
8. Fête du solstice. Dans la nébuleuse d'Orion.
9. Un des rares astres à posséder de l'eau liquide. Anciennes monnaies.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2			■								■	
3							■					
4		■		■							■	
5					■			■		■		
6				■								■
7						■			■			
8					■							
9							■					

### Verticalement

1. Constituant de l'eau.
2. L'ESA des Français. Il vit dans l'eau.
3. Il vit sur l'eau.
4. Elle est dans l'eau. Demi-chanteur.
5. Duras. Exclamation.
6. Plein d'eau. Pour faire son droit.
7. Pris de l'eau. Mettre de l'eau.
8. Pont de Paris. But.
9. Elle peut vous faire ronfler. Pas du tout rationnel.
10. Dans l'eau, dans l'œil, sur une toile, chez les astrographes et même à l'OHP. Rejeter.
11. Nombre de nucléons d'un des constituants de l'eau.
12. Il permet à certains mammifères de faire des jets d'eau. Institut d'études spatiales. Réponses page 40

## L'origine de l'eau sur Terre






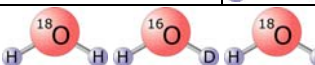
*Cécile Ferrari, astrophysicienne au CEA, professeur à Paris 7 et présidente du CLEA*

*Une minutieuse enquête d'investigation pour retrouver l'origine de l'eau sur Terre à partir des rapports D/H mesurés dans les comètes et les chondrites carbonées. Une méthode apparemment simple qui se révèle délicate de fait des mouvements migratoires des planètes géantes.*

La Terre est recouverte d'océans, dont la masse reste pourtant négligeable en proportion de celle des roches. La question de l'origine de l'eau qu'ils contiennent n'en est pas pour autant facile à résoudre. En effet, la quantité d'eau disponible dans la zone des planètes telluriques au moment de leur formation est faible. D'abord du fait de la température qui y règne, ensuite parce que la température d'un embryon planétaire, en fusion à ce stade, va causer l'évaporation de l'eau éventuellement présente dans les roches agglomérées. Il faut donc envisager un apport tardif de planétésimaux riches en eau, un apport conséquent tout de même. D'où vient cette eau si elle n'a pas été apportée par les roches agglomérées pour former l'embryon terrestre ? Une réponse difficile à donner qui repose sur de nombreuses inconnues que les astrophysiciens tentent de cerner. La mission Rosetta vient apporter sa pierre à l'édifice.

### Marquer l'eau : le rapport D/H

L'eau de nos océans est « marquée ». Cette marque signe-t-elle son origine ? Cette marque, c'est la substitution dans la molécule d'eau d'un atome d'hydrogène (H) par un atome de deutérium (D), isotope de l'hydrogène, pour former HDO. Il faut bien noter que d'autres isotopes de l'eau existent puisque l'oxygène possède trois isotopes stables dont les deux principaux,  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ , permettent de former  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$  et  $\text{HD}^{18}\text{O}$ . L'eau nous présente donc des facettes bien diverses.

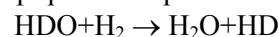
$^1\text{H}$ ou H	Hydrogène léger (le plus courant) : 1 proton (+ 1 e)	
$^2\text{H}$ ou D	Hydrogène « lourd » ou deutérium : 1 proton + 1 neutron (+ 1 e)	
$^{16}\text{O}$	Oxygène le plus abondant : 8 protons + 8 neutrons (+ 8 e)	
$^{18}\text{O}$	Isotope de l'oxygène : 8 protons + 10 neutrons (+ 8 e)	
$\text{H}_2\text{O}$	Eau. Forme la plus courante $\text{H}_2^{16}\text{O}$ : 2 atomes de $^1\text{H}$ + 1 atome de $^{16}\text{O}$ .	
	Autres formes :	

Le compte de l'abondance relative de ces isotopes dans l'eau de nos océans permet d'établir un standard, le VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), l'eau des océans moyenne et standard, pour lequel  $\text{D}/\text{H} = 155,8 \times 10^{-6}$ . L'eau a évidemment été purifiée préalablement de tous les sels et des micro-organismes.

Le rapport isotopique standard RSTD pour l'eau est défini comme le rapport d'abondance entre l'isotope le plus lourd, donc HDO ici, et le plus léger,  $\text{H}_2\text{O}$  :

$$R_{\text{STD}} = \frac{[\text{HDO}]}{[\text{H}_2\text{O}]}$$

Le principal réservoir de deutérium (D) dans la nébuleuse solaire est l'hydrogène moléculaire ( $\text{HD}$  et  $\text{H}_2$ ). Dans leur phase vapeur, les molécules plus massives (dont l'eau qui est la plus présente) vont interagir avec cet hydrogène et opérer un échange isotopique. Dans l'eau protosolaire, on s'attend à un rapport  $\text{D}/\text{H}$  de  $1\,000 \times 10^{-6}$  entre HDO et  $\text{H}_2\text{O}$ . Il est donc nécessaire, pour expliquer les rapports  $\text{D}/\text{H}$  plus faibles observés aujourd'hui dans le Système solaire que l'échange isotopique entre HDO et  $\text{H}_2$  ait réduit le rapport initial dans l'eau protosolaire. Les conditions de cet échange vont varier avec la distance au Soleil, la turbulence dans la nébuleuse protosolaire, la densité du gaz, etc... L'efficacité de l'échange isotopique décrit par la réaction :



est corrélée avec la température et la densité du gaz. On s'attend donc à ce qu'il augmente avec la distance au Soleil.

### La provenance de l'eau : vaste question

D'où vient l'eau ? Les sources sont des objets formés plus loin, sans doute au-delà de la ligne des glaces d'un Soleil jeune, là où l'eau peut se condenser et s'agglomérer avec des grains de roche. Les chondrites carbonées qui forment un sous-ensemble des météorites de roches primitives, contiennent beaucoup d'eau par exemple. Les comètes encore plus, puisque l'eau en est le composant essentiel.



Dès que l'eau condense sous forme de glace, celle-ci enregistre le rapport isotopique de la vapeur d'eau, D/H, à cet instant et à cet endroit. Évidemment tout ceci se passe dans une nébuleuse chauffée et turbulente où la convection favorise le mélange... La turbulence du gaz va transporter et mélanger les petits grains condensés jusqu'à ce qu'ils soient assez gros pour avoir un mouvement indépendant du gaz turbulent. Cette étape de modélisation de l'histoire dynamique est peu connue. Les modèles proposés couplant ces effets complexes montrent tous que l'enrichissement de l'eau en deutérium augmente avec la distance. Sans prendre en compte la turbulence, on peut faire apparaître déjà avec certains modèles un ordre de grandeur en enrichissement entre 5 et 50 ua (unités astronomiques). On perçoit ici la difficulté à fixer la provenance, le site de condensation d'une molécule de glace. La turbulence ne semble cependant pas capable de modifier cette tendance profonde à une augmentation de D/H dans l'eau avec la distance. On peut donc espérer que tous les corps sans atmosphère primitive aient une marque de D/H qui témoigne du lieu où les grains qui les constituent ont été formés.

Les grains de glace se découplent ensuite de la dynamique du gaz et vont former des corps plus gros, comme les comètes ou intégrer des corps en proportion plus rocheux. Les grains sédimentent et s'agglomèrent dans le plan du disque protoplanétaire en moins d'un million d'années et forment des embryons planétaires, les planétésimaux. Les planètes géantes se forment très vite, en moins de dix millions d'années, assez vite pour agglomérer le gaz primordial de la nébuleuse avant qu'elle ne s'évapore. Une difficulté supplémentaire apparaît alors si l'on considère l'histoire dynamique des planètes. Elles entrent en résonance mutuelle et génèrent alors un grand chaos, celui du grand bombardement tardif, entre 700 et 800 millions d'années, un chaos qui va disperser les planétésimaux résiduels de la zone des planètes géantes dans tous les coins du Système solaire. De telle manière qu'il est difficile de savoir à quel endroit effectivement un corps a été formé, car il n'y est vraisemblablement pas toujours resté. Ainsi la carte initiale du rapport D/H en fonction de la distance, « gelée » dans les grains de glace, est-elle peut-être aujourd'hui complètement brouillée et effacée. Le décodage de la carte actuelle s'annonce ardu...

## Les rapports D/H dans le Système solaire

Le rapport isotopique D/H du gaz primordial de la nébuleuse proto-solaire est mesuré dans la molécule

H<sub>2</sub>, sous l'effet de l'échange isotopique HD-H<sub>2</sub>. Celui des atmosphères des planètes géantes Jupiter et Saturne définit le rapport D/H de la nébuleuse protosolaire. Il vaut  $25 \times 10^{-6}$ . Les rapports D/H légèrement plus élevés d'Uranus et de Neptune peuvent s'expliquer par le fait qu'elles ont été formées de planétésimaux agglomérés plus loin, de grains de glace à D/H plus important (voir figure 1). Le rapport D/H mesuré à partir de l'eau présente dans les chondrites carbonées s'avère être en moyenne très proche de celui de la Terre, aux alentours de  $(140 \pm 10) \times 10^{-6}$  à comparer à  $(156 \pm 1) \times 10^{-6}$ . Les poussières interplanétaires montrent une plus grande diversité dans ce rapport, avec un pic proche de celui des chondrites carbonées mais très large, s'étendant vers les valeurs des comètes. Ce réservoir de poussières est donc sans doute alimenté par tous ces petits corps.

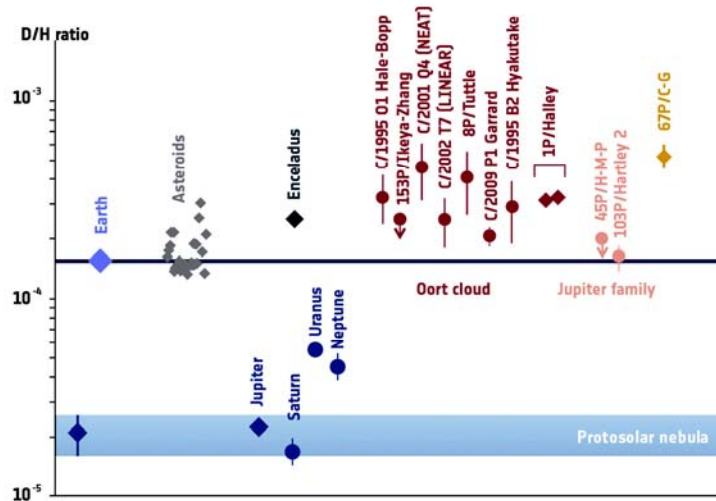
Notre Système solaire semble être nanti de deux réservoirs de comètes situés à des distances bien différentes, l'un dans la ceinture de Kuiper entre 30 et 50 ua, l'autre dans le nuage de Oort au-delà de 5 000 ua du Soleil. Vu la théorie avancée jusqu'ici, on devrait donc s'attendre à des rapports D/H bien distincts pour ces deux familles. Il faut cependant tenir compte de l'évolution de notre système planétaire décrite plus haut. Le désormais célèbre modèle de Nice, qui prédit ce coup de balai monumental des planètes géantes, nettoyant tout leur environnement des planétésimaux qui les entourent, suggère que les comètes de Oort ont été formées dans la zone originelle de Jupiter et Saturne, certains pensent qu'elles sont nées plutôt dans le voisinage d'Uranus et de Neptune. Les objets de la ceinture de Kuiper, qui sont actuellement plus proches de nous que les comètes de Oort, auraient été formés en fait plus loin, au-delà de l'orbite de Neptune à l'époque, c'est-à-dire entre 15 et 30 ua. Ceux d'entre eux qui sont plus excités dynamiquement, et suivent des orbites très excentriques car ils ont subi une influence gravitationnelle importante de Neptune dans leur histoire, constituent le Disque Diffusé. Les comètes qui voyagent dans le Système solaire intérieur, à courte période, désignées sous le nom de famille de Jupiter, viendraient de cette région-ci.

Vu ces pronostics, on peut donc s'attendre à ce que les rapports isotopiques des comètes de la famille de Jupiter aient un rapport D/H plus fort, car formées plus loin que celles du nuage de Oort. Il faut aussi s'attendre, vu l'incertitude sur l'origine des comètes de Oort, que leur D/H soit assez varié et donc que la distinction soit de fait assez difficile à faire. Déjà, parmi ces comètes, Halley, Hale-Bopp et Hyakutake, présentent des D/H mesurés dans l'eau très



similaires :  $[310 \pm 40, 290 \pm 80, 330 \pm 80] \times 10^{-6}$  respectivement. Est-ce fortuit ou se sont-elles effectivement formées au même endroit ? Les mesures de D/H dans le domaine radio faites pour établir ces rapports sont difficiles. L'échantillon est statistiquement trop réduit pour conclure à ce stade.

Avec quelques autres mesures, la valeur moyenne du rapport D/H dans les comètes du nuage de Oort est estimé, en 2011, à  $(295 \pm 25) \times 10^{-6}$ , un facteur 2 donc au-dessus du VSMOW. À ce stade, il semble acquis que le réservoir d'eau terrestre se trouve dans la ceinture des astéroïdes.



Rapport D/H mesuré dans le Système Solaire dans les différents groupes identifiés : planètes géantes (bleu nuit), comètes de Oort (rouge), comètes joviennes (rose), chondrites carbonées (gris), Terre (bleu clair) et Tchourioumov-Guérassimenko (jaune). (d'après 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio, K. Altwegg et al., Science express reports, 11 Dec 2014 / Page 1 / 10.1126/science.1261952)

## Les dernières nouvelles du front D/H

De nouvelles mesures ont pu être faites récemment dans les deux réservoirs cométaires grâce au satellite Herschel et à l'exploration in situ de la sonde Rosetta.

Le satellite Herschel, grâce à sa couverture du domaine infrarouge et sub-millimétrique a observé la comète à courte période 103P/Hartley 2 de la famille de Jupiter. Les mesures ont été faites à partir de la vapeur d'eau libérée dans la coma, spécifiquement avec les molécules  $H_2^{18}O$  et HDO. À défaut d'interprétation fiable des raies de rotation de la molécule  $H_2^{16}O$ ,  $H_2^{18}O$  permet une détermination, difficile certes mais plus fiable dans ce cas, du rapport D/H. Les fréquences des raies de rotation des molécules d'eau HDO et  $H_2^{18}O$  sont évidemment différentes puisqu'elles dépendent des masses des atomes présents : pour HDO, elle se trouve à 509,292 GHz (589  $\mu$ m) et pour  $H_2^{18}O$  à 547,676 GHz (548  $\mu$ m). Le calcul du rapport D/H nécessite un modèle pour traduire l'intensité des raies émises en taux de production des molécules et en densité présente ainsi que la mesure de  $^{18}O/^{16}O$  dans la vapeur d'eau. Le rapport D/H déterminé par cette méthode est de  $(161 \pm 25) \times 10^{-6}$ , donc pleinement compatible avec la valeur mesurée sur

Terre ! Ce rapport est clairement plus faible que celui des comètes de Oort, censées être formées plus près du Soleil et donc avoir un D/H plus faible. Ceci pose donc la question de savoir si c'est l'hypothèse de lieu de formation de cette comète qui n'est pas le bon ou si c'est la dépendance effective à la distance héliocentrique qui n'est pas conforme à l'attendu du modèle. Peut-être cette comète a-t-elle été formée plus près, du côté des astéroïdes troyens qui ont peu bougé de leur proche voisinage de Jupiter. Ou bien encore, est-ce le modèle dynamique de turbulence dans le nuage de gaz protosolaire qui n'est pas le bon, minimisant l'effet de la turbulence qui aurait en réalité opéré un mélange bien plus conséquent des grains proto-cométaires... Ou bien la région où le D/H est comparable à celui de la Terre est plus étendue qu'attendue ! Le réservoir d'eau potentiel de la Terre s'étendrait alors plus loin que la ceinture des astéroïdes et pourrait être d'origine cométaire aussi... mais dans quelle proportion ?

Une mesure plus récente sur une comète du nuage de Oort, C/2009 P1 (Garrad), avec le même instrument et plusieurs raies d'émissions dont celle de  $H_2O$  à 556,936 GHz cette fois-ci, a produit un rapport D/H de  $(206 \pm 22) \times 10^{-6}$ , donc bien plus faible et significativement différent du rapport attendu de  $295 \times 10^{-6}$ . Au sein d'un même réservoir, la diversité serait-elle donc de rigueur ? De plus la

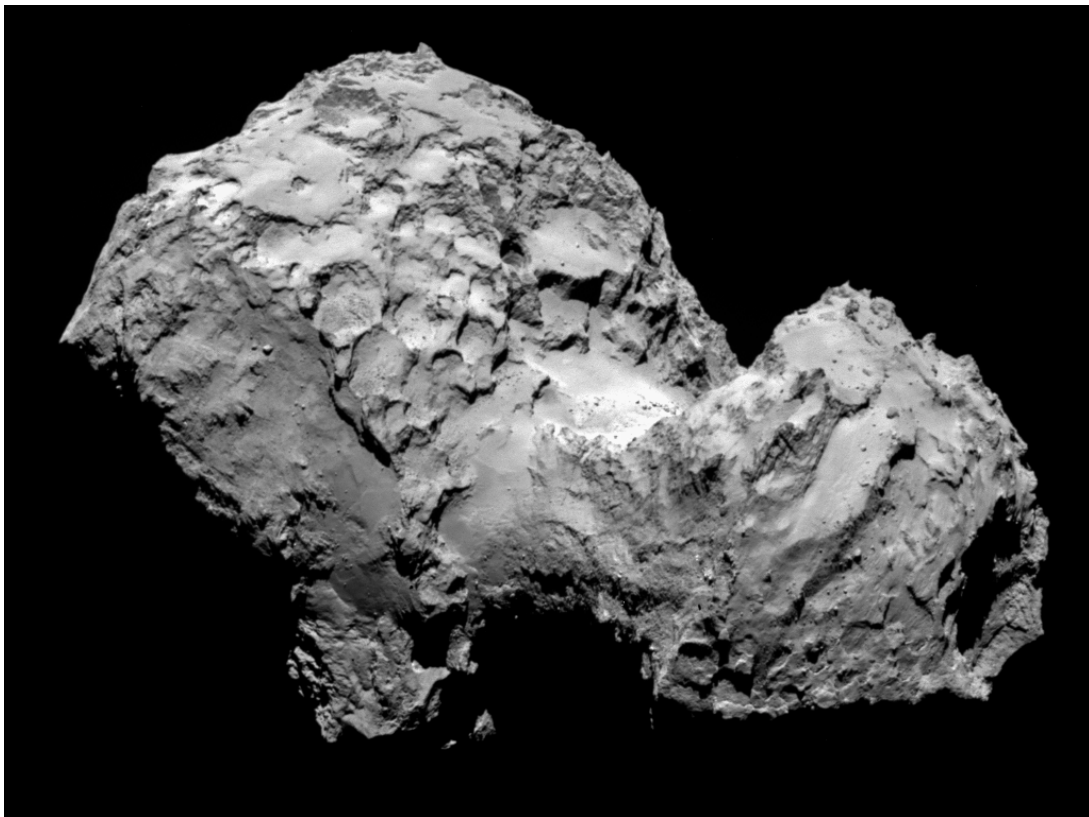
dichotomie du rapport D/H entre les deux réservoirs semble s'effacer... Ce rapport reste cependant significativement différent du rapport isotopique terrestre. Pour aller dans ce sens-là encore, l'estimation du rapport D/H pour la comète de Halley a été réévaluée depuis à  $210 \times 10^{-6}$  au lieu de  $310 \times 10^{-6}$ .

Reste à savoir si le rapport D/H mesuré dans la coma par cette méthode est le même que sur le noyau de la même comète ! En effet, on pourrait penser que le rapport D/H dans la vapeur est différent de celui mesuré dans la glace, in situ, l'éjection favorisant peut-être les molécules les plus légères et donc moins riches en deutérium, par ce qu'on appelle un fractionnement cinétique. D'où l'intérêt de mesurer le rapport D/H in situ de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, alias « Tchouri ».

### Le rapport D/H de « Tchouri »

La mesure faite pour la comète de Halley de la sonde Giotto était certes in situ, réalisée non plus en spectroscopie de raies d'émission mais avec un spectromètre de masse. Le rapport D/H de l'eau dépendait cependant d'une hypothèse sur le rapport isotopique de l'oxygène. Le spectromètre de masse ROSINA de la sonde Rosetta a pu mesurer direc-

tement le rapport D/H dans l'eau à partir des molécules  $\text{HD}^{16}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$  et  $\text{HD}^{18}\text{O}/\text{H}_2^{18}\text{O}$  en août dernier, à seulement 60 km de distance du noyau de « Tchouri ». Il a détecté dans la coma, autour de la masse 19 uma (unité de masse atomique), de nouvelles émissions au-dessus du bruit. En effet, à cette masse, on trouve le fluor de la fluorine (la graisse embarquée, de masse atomique 18,99 uma), les molécules  $\text{H}^{18}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$  qui vont gêner la mesure de  $\text{HD}^{16}\text{O}$  si son émission n'est pas assez puissante. À cette altitude, elle l'est et le rapport D/H pour  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  donne  $(530 \pm 70) \times 10^{-6}$  !!! Une valeur donc bien au-dessus des mesures obtenues pour les comètes de la même famille de Jupiter, telle Hartley 2, et un facteur presque deux au dessus de celui des comètes de Oort. Cette mesure est donc cohérente avec un modèle qui propose une variation croissante de D/H en fonction du lieu de formation et un scénario d'évolution dynamique tel que proposé par le modèle de Nice. Cependant ce résultat implique que le réservoir des comètes joviennes suit aussi le principe de diversité ?! Finalement le réservoir de l'eau terrestre serait-il essentiellement niché dans les astéroïdes ? Contrairement aux apparences, nous progressons sur la question !!



La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko photographiée le 3 août dernier par l'instrument OSIRIS de la sonde Rosetta à une distance de 285 km. La résolution de l'image est de 5,3 mètres par pixel (Crédit photo ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/ IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA. ■

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Un thème de SVT en classe de seconde

La Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution du vivant : une planète habitée

Bernard Colomb, Professeur de SVT retraité

*L'auteur nous présente ici comment on peut aborder ce thème avec nos élèves à partir de nombreux documents.*

Le thème 1 du programme de SVT de la classe de seconde s'intitule « La Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution du vivant : une planète habitée ». Le préambule du programme précise que, dans ce thème, « on étudie successivement les caractéristiques de la Terre qui permettent de comprendre que la vie s'y développe, quelques originalités de fonctionnement et d'organisation du vivant et quelques idées sur la biodiversité et son origine évolutive ».

Avant de comprendre ce qu'est un être vivant, ou de comprendre comment il fonctionne, il est intéressant de voir comment cette richesse en eau est possible sur Terre et non sur les planètes voisines. On étendra le propos aux exoplanètes.

Dans le cadre du premier TP de l'année, la problématique pourrait être : quelles sont les conditions sur Terre qui ont permis et qui permettent encore le maintien de la vie ?

Chacun des problèmes qui suivent peut être traité par des activités regroupées en « tâche complexe » (l'élève chemine à sa guise à travers des documents pour élaborer une réponse structurée au problème posé).

Les documents sont proposés à la fin de l'article.

### Premier problème

*À partir des documents 1 à 5, quelles sont les conditions physico-chimiques sur Terre, vu sa position dans le système solaire ?*

Réponse attendue : la position de la Terre (3° à partir du Soleil, à 150 millions de km) en fait une petite planète (doc 1) rocheuse (doc 1 ou 2) de nature silicatée (doc 1) – mais avec un noyau de fer et de nickel – donc dense (doc 1 ou 2)<sup>7</sup>. Elle possède de l'eau sous 3 états (doc 5) et sa température théorique est proche de 0 °C (-18 °C en tenant compte de l'albédo).

<sup>7</sup> Dans le système solaire, les planètes proches du Soleil sont denses. Mais on a trouvé des « jupiters chauds » autour d'autres étoiles (qui se sont sans doute formées à plus grande distance avant de migrer).

### Deuxième problème

*L'atmosphère peut-elle expliquer la différence entre la température théorique et la température mesurée pour la Terre (doc 3 à 8) ?*

Réponse attendue : les documents suggèrent fortement le rôle de l'atmosphère pour expliquer la différence entre -18 °C (théorique) et +15 °C (mesurée) (doc 4) : épaisseur de l'atmosphère de la Terre (doc 8), températures T<sub>2</sub> et T<sub>moy</sub> identiques pour Mercure (doc 4) en relation avec l'épaisseur nulle de son atmosphère (doc 8), grande différence des températures pour Vénus (doc 4) en relation avec son atmosphère notable (doc 8)...

Bilan provisoire : l'eau sous 3 états, une température moyenne de 15 °C et la présence d'une atmosphère annoncent les conditions favorables à la vie telle qu'on la connaît.

### Troisième problème

*À partir des documents 7 et 8, comment les données physico-chimiques de l'eau confortent-elles les conclusions précédentes ?*

Progression possible :

- L'eau est peu présente en gaz dans l'atmosphère terrestre (doc 8) mais pas rare par rapport aux corps voisins ; elle est abondante à l'état liquide (océans) et solide (glaces aux pôles).

- On place la Terre sous la forme d'un segment sur le document 7 (P ≈ 1 000 hPa, T de -90 °C à +60 °C) ; les températures extrêmes sur Terre permettent de comprendre que l'eau est sous deux états (solide et liquide).

- La situation gazeuse se comprend grâce à la remarque de la figure 7.

- Comme pour la Terre, on positionne Mars avec un segment sur le graphique 7 avec les données des documents 4 et 8, à savoir T de -130 à 0 °C et P à 6 hPa : on visualise qu'il n'y a pas d'eau liquide possible.

- On extrapole pour Vénus en voyant qu'à ces pressions et températures, il semble qu'on ne puisse être que dans la phase gazeuse.



Réponse attendue : les pressions et températures autorisent pour la Terre seule (par rapport à ses voisines) une abondante eau liquide en présence de glace, sans interdire pour autant une phase gazeuse.

Bilan provisoire : l'atmosphère corrige la température attendue ; par sa composition et son épaisseur elle établit une pression atmosphérique compatible avec la présence d'eau sous les 3 états.

#### Quatrième problème

À partir des documents 9 à 12, comment l'effet de serre agit-il et permet-il à la planète Terre d'être habitable ?

Exploitation possible :

Le document 9 montre que tout corps chaud émet des IR.

Le document 12 montre que l'eau (surtout) et le CO<sub>2</sub> sont prédominants dans l'effet de serre alors qu'ils sont peu représentés en pourcentage dans l'atmosphère.

Réponse attendue : l'eau et le CO<sub>2</sub> atmosphériques piègent indirectement l'énergie solaire reçue au sol ; La température mesurée est bien supérieure (mais pas trop) à la température théorique, ce qui rend la Terre habitable.

« L'habitabilité » est renforcée par O<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> (voir doc 10 et 12)

#### Cinquième problème

Comment la Terre garde-t-elle son atmosphère ?

La Terre a une masse suffisante – voisine de celle de Vénus, supérieure à celle de Mars – pour retenir les molécules des gaz de son atmosphère (on pourrait également montrer que la température de la Terre n'étant pas trop forte, l'agitation des molécules de l'atmosphère n'est pas suffisante pour les perdre dans l'espace.

#### Sixième problème

À partir des documents 13 à 15, comment reconnaître dans les centaines d'exoplanètes recensées celles qui peuvent être habitables (c'est-à-dire celles qui ont des conditions proches de celles qui sur Terre ont permis à la vie de se développer) ?

- Le document 13 montre la forme de la bande attribuée à la zone d'habitabilité (elle est plus distante pour les étoiles les plus massives). Une exoplanète de type « Terre » pour une naine rouge doit se trouver à une distance comprise entre 0,2 et 0,3 UA.

- Les documents 14 et 15 concernent l'étoile naine rouge Gliese et seule la planète Gliese d à 0,22 UA satisfait au critère de distance à son étoile (les autres planètes étant trop chaudes car trop proches).

Quelques réserves :

- Les températures de surface ne sont pas celles du sous-sol ou de l'atmosphère.

- La moisson des exoplanètes continue : le catalogue des planètes habitables augmente ; ce qui n'implique pas pour autant qu'elles aient été ou qu'elles sont habitées...

#### BILAN

1. La distance Terre-Soleil impose une température à une Terre rocheuse ; cette température est heureusement modulée par une atmosphère. Les 2 facteurs physiques (P, T) conditionnent une eau abondante à l'état liquide (utilisée comme milieu de vie).

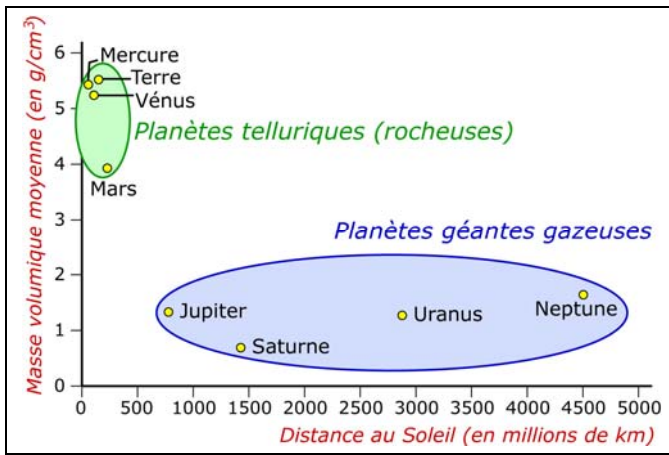
2. La masse de la Terre lui permet de garder par gravité son atmosphère protectrice de sa vie grâce à une couche d'ozone filtrant les U.V. nocifs.

3. Ces conditions peuvent exister sur des exoplanètes sans la vie.

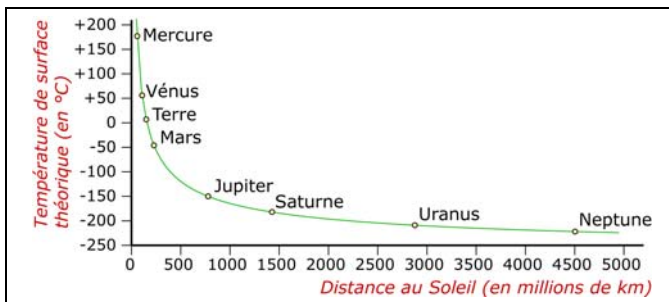


Objets	Planètes rocheuses et Lune					Planètes gazeuses			
	Mercury	Vénus	Terre	Lune	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
d Soleil (10 <sup>6</sup> km)	58	108	150	150	228	778	1 427	2 871	4 497
Diamètre (km)	4 880	12 100	12 740	3 470	6 780	140 000	116 000	51 000	49 000
Masse (10 <sup>24</sup> kg)	0,33	4,9	6	0,07	0,64	1900	570	87	102
Densité	5,4	5,2	5,5	3,3	3,9	1,3	0,7	1,3	1,6
Composants	Silicates (Si+O) + fer et nickel (sauf Lune)					Hydrogène, hélium			

Doc.1. Les planètes et leurs caractéristiques. Sur le schéma du haut, les diamètres sont à la même échelle mais les distances au Soleil ne sont pas respectées.



Doc.2. Masse volumique en fonction de la distance au Soleil.



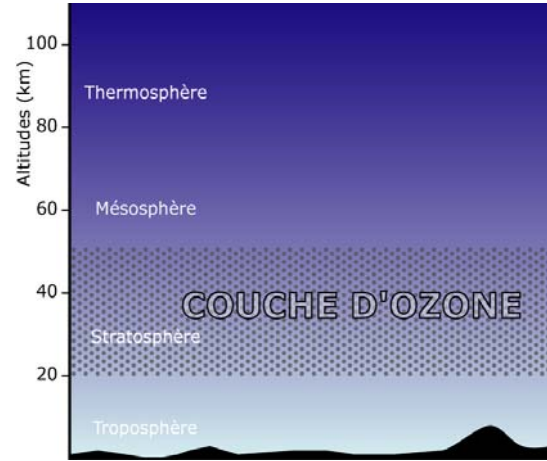
Doc.3. Température théorique en fonction de la distance au Soleil. La température est calculée ici sans tenir compte de l'albédo (proportion de lumière réfléchiée par la planète) ni de l'effet de serre. Pour la Terre par exemple, la température théorique est ici de 7 °C. Si on tient compte de l'albédo de la Terre (0,3 ou 30 %), on trouve -18 °C.

en °C	T1	albédo	T2	Tmin	Tmoy	Tmax
Mercure	180	0,12	160	-160	160	440
Vénus	56	0,75	-40	446	462	490
Terre	7	0,31	-18	-93	15	57
Mars	-46	0,25	-60	-133	-60	-3

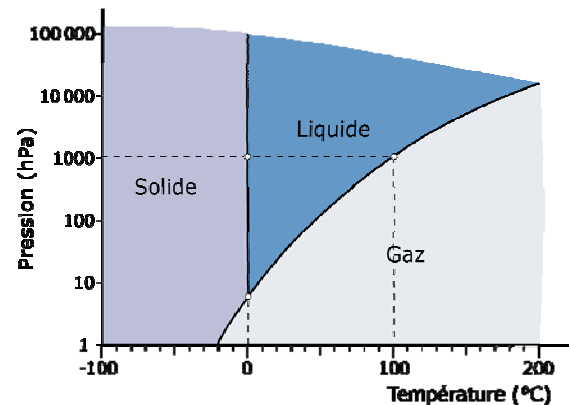
Doc.4. Températures moyennes théoriques (T1 et T2) et températures observées (Tmin, Tmoy, Tmax) à la surface des planètes telluriques. La première (T1) est calculée en supposant que la planète absorbe toute l'énergie qu'elle reçoit, la deuxième (T2) tient compte de l'albédo de la planète (proportion de lumière réfléchiée). Les suivantes proviennent d'observation.

	Eau
Mercure	Absence
Vénus	Gaz
Terre	Gaz, liquide, solide
Mars	Gaz, solide

Doc.5. L'eau sur les planètes telluriques.



Doc.6. Les couches de l'atmosphère.



Doc.7. Les états de l'eau.

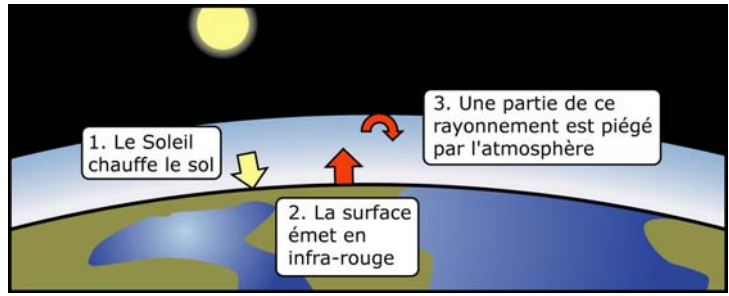
Remarque : la vapeur d'eau se forme continuellement par évaporation dès que l'eau liquide est surmontée d'une couche de gaz, sans que la température n'ait besoin d'atteindre la température d'ébullition.

	Épaisseur	Masse atm.	Pr. au sol (hPa)	Composants de l'atmosphère sèche	Vapeur d'eau
Mercure	Pas d'atmosphère				
Vénus	300 km	$4,8 \times 10^{20}$	92 000	CO <sub>2</sub> (96 %), N <sub>2</sub> (3,5 %)	0,002 %
Terre	800 km	$5 \times 10^{18}$ kg	1 013	N <sub>2</sub> (78 %), O <sub>2</sub> (21 %), Ar (0,93 %), CO <sub>2</sub> (0,04 %)	de 1 à 5 %
Lune	Pas d'atmosphère				
Mars	200 km	$2,5 \times 10^{16}$ kg	6	CO <sub>2</sub> (95 %), N <sub>2</sub> (2,7 %), Ar (1,6 %)	0,03 %

Doc.8. Comparaison de l'atmosphère des planètes telluriques. Il n'y a pas de frontière nette entre l'atmosphère et l'espace. Les valeurs données pour l'épaisseur peuvent donc beaucoup varier suivant les sources.



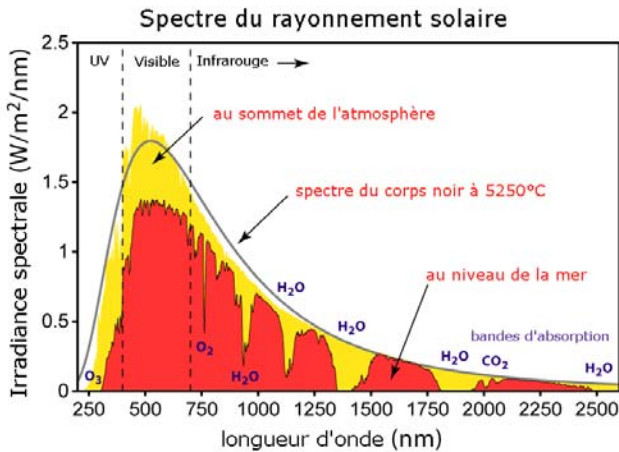
**Doc.9.** Image d'une habitation en infra rouge. Tout corps émet des ondes électromagnétiques en fonction de sa température. Pour des températures comme celles rencontrées sur Terre, comprises entre  $-50$  et  $+50$  °C, l'émission a lieu principalement dans l'infrarouge. Un capteur sensible à ce rayonnement peut ainsi mesurer la température, ce qui permet de connaître les déperditions énergétiques. (image 123RF/ginasanders).



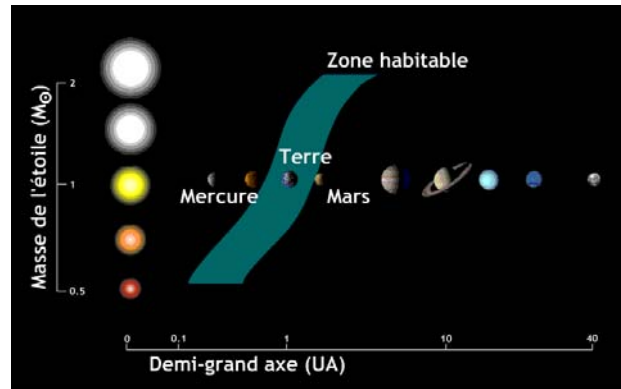
**Doc.11.** Principe de l'effet de serre.

Gaz	Concentration (%)	Participation à l'effet de serre (%)
Diazote (N <sub>2</sub> )	78,1	0
Dioxygène (O <sub>2</sub> )	20,9	0
Argon (Ar)	0,9	0
Eau (H <sub>2</sub> O)	1	60
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,038	25
Méthane (CH <sub>4</sub> ), oxyde nitreux (NO <sub>2</sub> ), ozone (O <sub>3</sub> )	0,0002	15

**Doc.12.** Les gaz à effet de serre sur Terre.



**Doc.10.** Spectre solaire. La différence entre la courbe jaune et la courbe rouge provient de l'atmosphère terrestre. On remarque du côté gauche l'absorption des UV par l'ozone (O<sub>3</sub>) et à droite l'absorption des infrarouges par l'eau et le dioxyde de carbone. (Image wikipedia par Global Warming Art)



**Doc.13.** Zone habitable autour de différentes étoiles. Les étoiles de 0,5 masse solaire sont plutôt rouges et moins chaudes que le Soleil (environ 4000 °C de température de surface) mais vivent plus longtemps. Les étoiles de 2 masses solaires sont bleutées et plus chaudes que le Soleil (près de 10 000 °C). La zone habitable d'une étoile est la zone où l'eau liquide peut exister à la surface d'une planète. Elle dépend de la température de l'étoile. Elle est indiquée ici en unités astronomiques (1 ua = distance moyenne Terre Soleil ≈ 150 millions km). (crédit CETI/Observatoire de Paris).

Planète	$M[\sin(i)]$ (M <sub>Jup</sub> )	Période (jours)	Demi-grand axe (UA)
Gl 581 b	0.05	5.36865	0.041
Gl 581 c	0.017	12.9182	0.073
Gl 581 d	0.019	66.64	0.22
Gl 581 e	0.0061	3.14945	0.028

**Doc.14.** Extrait du site de l'observatoire de Paris sur les exoplanètes (<http://media4.obspm.fr/exoplanetes>) La première colonne indique le nom de la planète. La deuxième donne la masse minimale de la planète en masse de Jupiter (avec une imprécision due à l'inclinaison de l'orbite qui est inconnue). Le demi grand axe est la distance moyenne de la planète à son étoile, en unités astronomiques (1 ua ≈ 150 000 000 km).

**SERVICE DE COMMUNICATION**  
 Université de Genève > Service de communication > Communiqués de presse > Année 2009 > CdP090421

**Une exoplanète encore plus légère - Les astronomes de l'UNIGE prennent dans leur filet une planète extrasolaire de très faible masse**

Le prof. Michel Mayor et ses collègues viennent de repérer la planète extrasolaire la plus légère jamais identifiée. Celle qui s'appelle « Gliese 581 e » a une masse qui avoisine deux fois celle de la Terre. Les chercheurs ont aussi affiné le calcul de la trajectoire orbitale de « Gliese 581 d » : ils peuvent à présent situer avec certitude cette autre exoplanète à l'intérieur de la zone habitable de son étoile-hôte, c'est-à-dire dans la région où l'eau peut exister à l'état liquide. Plus de cinq années passées à scruter les cieux, au moyen du détecteur d'exoplanètes de faibles masses les plus précis qui soit, débouchent sur ces découvertes, effectuées au Chili, à l'Observatoire européen austral (ESO).

**Doc.15.** Communiqué de presse du 21 avril 2009 de l'Université de Genève.



# LE COIN DES PETITS CURIEUX

Dans cette rubrique nous continuons à répondre à des questions d'écoliers.

## Que d'eau !

*ALEXIS* – Pour une fois, je ne vais pas te poser de question sur l'astronomie. Je ne sais pas si tu vas pouvoir me répondre.

*ÉMILIE* – De quoi s'agit-il ?

*ALEXIS* – L'été dernier avec mes parents et mes cousins nous sommes allés randonner en montagne. Nous avons dormi trois nuits en altitude. Le ciel était tout étoilé, c'était magnifique !

*ÉMILIE* – Tu vois tu me parles d'astronomie.

*ALEXIS* – Ma mère a voulu faire cuire des pâtes et il a fallu attendre longtemps et pourtant l'eau bouillait.

*ÉMILIE* – Sais-tu à quelle température l'eau bout ?

*ALEXIS* – Oui, cent degrés.

*ÉMILIE* – En fait il faut dire cent degrés Celsius car cette température est repérée dans l'échelle de Celsius qui est le nom d'un "savant" suédois qui d'ailleurs a fait de l'astronomie et qui a participé à l'expédition en Laponie.

*ALEXIS* – Oui, mais moi je te parle des pâtes qui ne cuisent pas.

*ÉMILIE* – C'est vrai. Pas d'astronomie. Donc l'eau bout à 100 °C, mais il faut ajouter à la pression atmosphérique normale, on dira simplement celle qui existe au niveau de la mer.

*ALEXIS* – Sinon, que se passe-t-il ?

*ÉMILIE* – Est-ce que ta maman utilise une cocotte minute ?

*ALEXIS* – Oui, ça fait cuire les légumes plus vite.

*ÉMILIE* – Sais-tu pourquoi ?

*ALEXIS* – Non. Peut-être parce qu'il y a un couvercle.

*ÉMILIE* – Presque ! Dans la cocotte, l'eau bout, la vapeur s'échappe, la pression augmente.

*ALEXIS* – Oui, parfois on entend pschitt !

*ÉMILIE* – Et comme la pression augmente, l'eau va bouillir à une température plus élevée, près de 120 °C.

*ALEXIS* – Et les légumes vont cuire plus vite.

*ÉMILIE* – Tu as tout compris. Mais quand tu es en montagne à 2 000 m d'altitude, la pression atmosphérique est plus faible et les pâtes vont mettre plus de temps pour cuire.

*ALEXIS* – Oui, mais tout de même j'ai vu l'eau bouillir.

*ÉMILIE* – Bien sûr qu'elle bout, mais sa température d'ébullition n'est que de 93 °C environ.

*ALEXIS* – Est-ce que l'on peut faire bouillir de l'eau à 40 °C ?

*ÉMILIE* – Oui, il suffit de diminuer la pression, par exemple en mettant un verre d'eau chaude sous une cloche dans laquelle on fait le vide. L'eau bout et si tu

mets ton doigt dedans, tu ne te brûles pas car l'eau est à 40 °C.

*ALEXIS* – Tu sais, pendant que l'on regardait les pâtes qui ne cuisaient pas, ma cousine a dit quelque chose que je n'ai pas compris.

*ÉMILIE* – C'est quoi ? De l'astronomie ?

*ALEXIS* – Non, elle a dit "c'est à cause de la température d'hache de zoo".

*ÉMILIE* – ah! Oui, ça va être compliqué, je t'expliquerai cela une prochaine fois.

*ALEXIS* – Non, non, essaie tout de suite.

*ÉMILIE* – Hum ! Toute matière est faite à partir de toutes petites particules que l'on appelle atomes.

*ALEXIS* – J'ai déjà entendu ce mot.

*ÉMILIE* – Il y a comme cela des atomes de fer, de cuivre, d'oxygène....

*ALEXIS* – ... d'eau, de bois, il y en a des millions !

*ÉMILIE* – Non, tout est fait à partir seulement d'une centaine d'atomes différents. Il n'y a pas d'atomes d'eau.

*ALEXIS* – Et pourtant l'eau existe bien !

*ÉMILIE* – Tu vois il y a des atomes qui s'aiment bien et qui se lient fortement les uns aux autres. Par exemple un atome d'oxygène que l'on écrit O, se lie à deux atomes d'hydrogène que l'on écrit H et cela donne une molécule d'eau, H<sub>2</sub>O.

*ALEXIS* – D'accord. C'est ça qu'a dit ma cousine. Alors quand je bois de l'eau, j'avale des molécules ?

*ÉMILIE* – Oui. Dans l'eau liquide les molécules se touchent et se déplacent les unes par rapport aux autres.

*ALEXIS* – Mais l'eau c'est toujours liquide.

*ÉMILIE* – Et un glaçon c'est quoi ?

*ALEXIS* – C'est de la glace.

*ÉMILIE* – La glace est constituée de molécules d'eau qui sont liées les unes aux autres. C'est un solide.

*ALEXIS* – Et de quoi est faite la vapeur que l'on voit au-dessus de la casserole ?

*ÉMILIE* – La vapeur est invisible. Ce que tu vois ce sont de toutes petites gouttelettes d'eau, comme dans le brouillard. Dans la vapeur, les molécules sont séparées les unes des autres par de grandes distances par rapport à leur taille et se déplacent dans tous les sens.

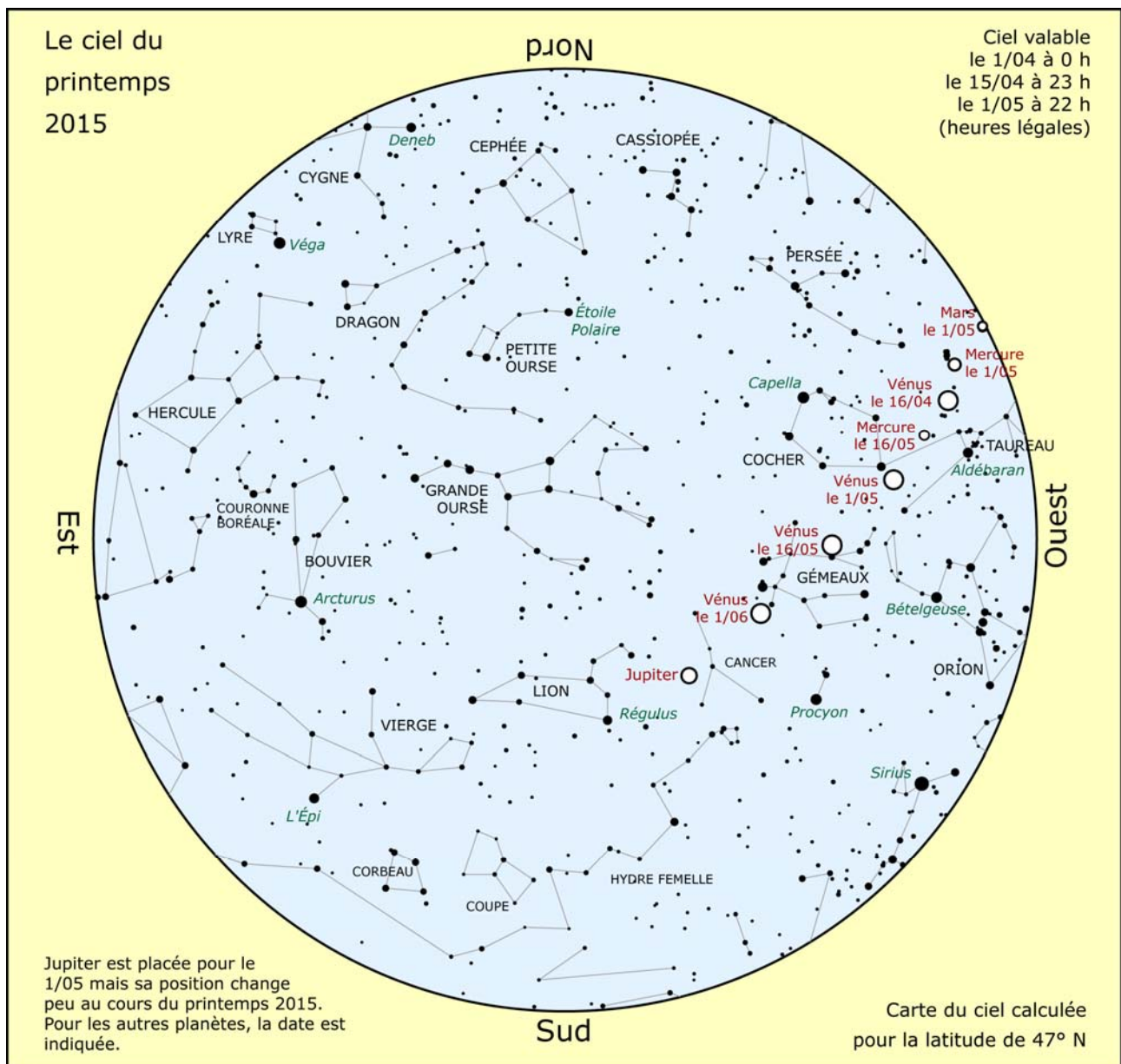
*ALEXIS* – .....

*ÉMILIE* – Ça te laisse rêveur.

*ALEXIS* –..... Je ne vais plus voir cuire les pâtes de la même façon.

Jean Ripert ■

# Le ciel du printemps 2015



## Visibilité des planètes

**Mercure** pourra être observée le soir à l'horizon ouest (ONO), peu après le coucher du Soleil de fin avril jusqu'au milieu du mois de mai. Elle sera très proche de l'amas des Pléiades les 30 avril et 1<sup>er</sup> mai.

**Vénus** est l'astre le plus brillant du ciel du soir à l'ouest. Son éclat sera maximal en juin-juillet 2015 (élongation maximale le 6 juin).

Mars est encore un peu visible le soir en avril.

Jupiter est observable le soir pendant tout le printemps, dans la constellation du Cancer puis du Lion. C'est l'astre le plus brillant après Vénus.

**Saturne**, la meilleure période pour l'observer sera la fin du printemps. Elle passe au plus près de la Terre fin mai et elle sera alors visible toute la nuit, dans la Balance.

## Quelques événements (heures légales)

20 mars Équinoxe de printemps.

20 mars Éclipse de Soleil, partielle en France.

29 mars Passage à l'heure d'été.

22 au 24 avril Étoiles filantes (Lyrides et Puppides).

23 mai Saturne est à l'opposé du Soleil.

12 juin Vénus se trouve à proximité de M44.

### 21 juin Solstice d'été.

30 juin Beau rapprochement des deux planètes les plus brillantes du ciel : Vénus et Jupiter distantes de  $0,4^\circ$ .

## Lune

Nouvelle Lune : les 20/03, 18/04, 18/05, 16/06.

Pleine Lune : les 4/04, 4/05, 2/06.

# REPORTAGE

*Lors d'un voyage à Huesca en Aragon pour les fêtes de San Lorenzo, nous avons rencontré Alberto Solanes, président de l'association astronomique locale et visité le planétarium. Sur son invitation, nous avons participé aux journées organisées à Boltana-Ainsa. Je leur ai demandé d'écrire des articles pour les Cahiers Clairaut. Le premier l'a été par le secrétaire de l'AAHu Juan Castiella Llorente et le second par Satur Garcia Marin de la Société Astronomique Populaire de la Côte Basque.*

*Jean Ripert*



## L'Association Astronomique de Huesca (AAHu)

Elle a été créée par un groupe d'amateurs en 1994. Elle comprend actuellement plusieurs centaines d'adhérents répartis principalement dans les localités de Huesca, Monzón, Sabiñánigo et Sariñena.

Depuis sa fondation, l'activité principale de l'association a été la vulgarisation de l'astronomie en organisant des causeries, des cours et des observations à travers toute la province.

L'association a été le promoteur d'un projet de planétarium "Espace 0.42"<sup>8</sup>, ouvert au public depuis octobre 2012 et qui reçoit plus de 35 000 visiteurs par an. Cet espace dispose d'un planétarium numérique de 65 places, d'un observatoire doté de trois télescopes, d'une salle d'exposition, de deux salles d'animation et d'un simulateur 4D (vision avec lunettes 3D et sièges mobiles).



Dans le domaine des observations astronomiques, le groupe GAM de l'AAHu gère à Monzón l'observatoire de Torres de Alcanadre équipé d'un télescope de 50 cm d'ouverture. Depuis "Espace 0.42", les télescopes sont utilisés pour des travaux d'astrométrie et de photométrie et l'association porte un nouveau projet : "Laguarta, cité des étoiles" dans les Pyrénées avec 51 observatoires contrôlés à distance.

L'AAHu se déplace souvent dans les établissements scolaires de la province de Huesca en réalisant des observations solaires, des discussions et des ateliers adaptés aux différents âges des jeunes. Ces activités

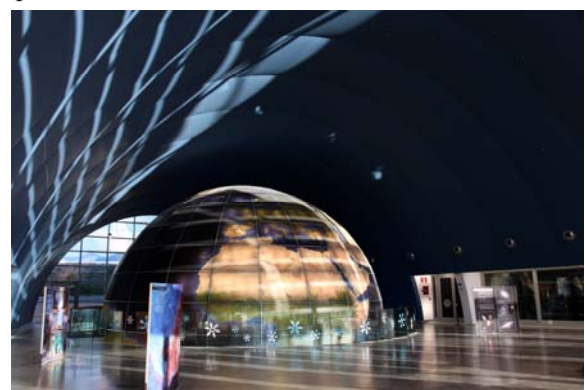
sont aussi réalisées à la demande de mairies et d'associations culturelles.

Aujourd'hui le volume a été réduit bien qu'une collaboration se maintienne grâce à des conventions avec

les mairies de Sabiñánigo et de Sariñena et le centre de vacances de Morillo de Tou situé dans les Pyrénées. L'atelier de lancement de fusée à eau et à air sous pression est l'activité la plus prisée, et la nuit ce sont les observations de la Lune, de Saturne et de Jupiter.



Le planétarium « Espace 0.42 » accueille le siège de notre association et reçoit en permanence la visite de groupes scolaires. Notre travail de vulgarisation en astronomie consiste essentiellement à fournir les contenus de ses ateliers, cours, conférences et expositions.



Pendant les vacances scolaires, nous nous chargeons d'assurer des cours d'astronomie spécifiquement destinés aux enfants. Nous collaborons avec le planétarium lors de sorties nocturnes avec des jeunes, lors des camps de « l'Académie des astronautes », et avec des collèges ou des lycées pour accompagner les

<sup>8</sup> Coordonnées de Huesca : longitude 0°24', latitude 42°08'.



élèves qui suivent les activités de l'Agence Spatiale Européenne.

En fin d'année, des ateliers didactiques sont réalisés pour les enfants dans plusieurs localités au moment des fêtes de Noël.



## Laguarta, cité des étoiles

Au mois d'octobre 2014, lors des VIes Rencontres Transfrontalières d'Astronomes Amateurs, organisées à Burgos avec la participation de la Société d'Astronomie Populaire de la Côte Basque, l'Association Astronomique de Huesca (AAHU) a présenté le projet « Laguarta : la cité des étoiles ».

Laguarta est une petite commune (14 habitants) de la province de Huesca (Espagne), située entre Sabiñánigo et Fiscal (1 185 mètres d'altitude 42° 24' 50" N, 0° 07' 09" O).

L'AAHu prévoit l'installation de 51 coupoles, disposées sur 3 arcs concentriques et aménagées pour accueillir les instruments. Elle se chargera également d'assurer les mesures de sécurité permettant une observation de qualité à distance et offrant en outre une assistance technique pour l'installation et la maintenance ainsi que des mesures pour sécuriser l'observation à distance.

Au mois de novembre, dans le cadre des XIVes journées astronomiques « Estrellas en el Pirineo » organisées par l'AAHu à Aínsa-Boltaña, Alberto Solanes (président de l'AAHu) et Ignacio Lacarte (architecte du projet) nous ont précisé quelles conditions atmosphériques et quels services nous offrirait Laguarta. Ils nous ont aussi informés qu'ils prévoyaient la possibilité de disposer de l'ensemble dès 2016.

### Pourquoi choisir Laguarta ?

La station météorologique du village a enregistré 235 nuits sans nuages par an. Laguarta est située dans une vallée orientée est-ouest, encadrée par deux chaînes montagneuses qui bloquent la lumière de Huesca et de Sabiñánigo, les deux agglomérations les plus importantes de la zone. Dans la vallée la densité de population est très faible et la pollution lumineuse négligeable. Les mesures réalisées avec SQM (Sky

Quality Meter) sont habituellement au-dessus de 21,5 mag/arcsec<sup>29</sup>. Laguarta n'étant pas au fond de la vallée, seul l'horizon nord est limité en dessous des 30°. L'accès par route se fait en moins d'une heure depuis Huesca.

### Description des installations.

Les observatoires seront disposés sur trois terrasses, harmonieusement intégrées au paysage. Il y en aura 51, d'une surface de 20 m<sup>2</sup> chacun. La première rangée disposera en plus d'un petit appartement de 30 m<sup>2</sup> avec tout ce qui est nécessaire pour y vivre quelques jours. En ce qui concerne les connexions Internet, il y aura un branchement dédié par radio avec le centre de communications du Pico del Águila, proche de Laguarta, ce qui assurera une communication rapide et fiable.



### Quels seront les services disponibles ?

Laguarta dispose d'un hébergement rural avec bar et restaurant, la « Casa El Señor ». Si des astronomes souhaitent un logement personnel, ils pourront louer l'un des 27 observatoires-appartements du premier niveau.

Afin de garantir la sécurité des installations, il y aura tous les systèmes nécessaires de surveillance et d'alerte. Il n'est pas prévu un service de maintenance « in situ » mais la proximité de villes comme Huesca, Sabiñánigo ou Jaca, garantit une assistance en moins d'une heure.

### Quand sera-t-il disponible ?

Les prévisions actuelles, selon les derniers contacts pris avec la mairie de Sabiñánigo, permettent de penser que les installations seront ouvertes, totalement ou en partie, en 2016.

Pour des informations complémentaires, prendre contact avec : AGRUPACIÓN ASTRONÓMICA DE HUESCA Parque Tecnológico Walqa, parcela 13 22197 Cuarte (Huesca)

Tel.: 974 23 03 22 info@aahu.es [www.aahu.es](http://www.aahu.es).

<sup>9</sup> Le SQM est un appareil mesurant la pollution lumineuse. La valeur exprimée en mag/arcsec<sup>2</sup> mesure la luminosité du ciel au voisinage du zénith.

<http://www.astrosurf.com/jpbousquet/Sky Quality Meter.htm>

# ARTICLE DE FOND

## La Nouvelle Musique des Sphères<sup>(\*)</sup>

Sylvie Vauclair, astrophysicienne à l'IRAP, professeur émérite de l'université de Toulouse

*Cet article nous invite à découvrir le « chant des étoiles ». Saviez-vous que le Soleil résonne en sol dièse et que chaque étoile semblable possède une signature musicale spécifique ? A la fin de l'article l'auteur nous invite à écouter un duo de « thérémine » composé à l'aide des fréquences observées dans les étoiles.*

Deux découvertes fondamentales sont venues récemment révolutionner nos connaissances sur les étoiles. Elles apparaissent a priori comme déconnectées, mais sont en fait très reliées l'une à l'autre. La première, c'est que les étoiles semblables à notre Soleil ont des vibrations internes, dues à des ondes sonores, ou ondes de pression, qui se propagent en permanence entre leurs régions profondes et leurs atmosphères, créant ainsi des variations de lumière et de vitesse radiale en surface, détectables par nos instruments actuels. La seconde, c'est qu'une large proportion de ces étoiles (peut-être 25 %) a des planètes en révolution autour d'elles.

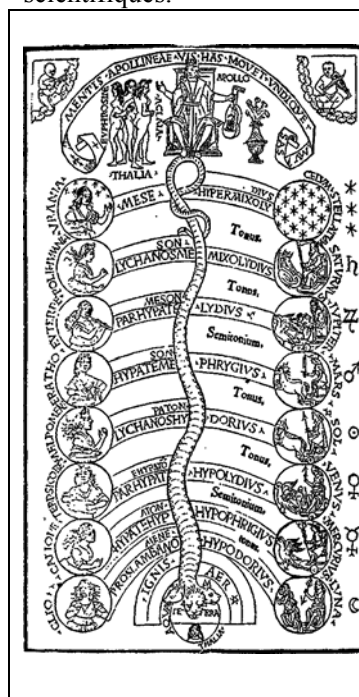
Ces deux découvertes ont été rendues possibles grâce à des technologies qui utilisent les mêmes instruments. Ce sont soit des spectrographes, qui permettent de détecter les mouvements détaillés des étoiles grâce à l'effet Doppler, soit des photomètres, utilisés pour étudier en détail les variations de lumière globale de l'étoile.

La première étoile dont les vibrations sonores ont été détectées est le Soleil, qui permet, grâce à sa proximité, des observations beaucoup plus détaillées que les étoiles lointaines. Cela se passait dans les années 1960-1970. On sait à présent que toutes les étoiles semblables au Soleil vibrent de la même manière. Les fréquences de vibration dépendent de la taille de l'étoile, de sa masse, de son âge, etc. Leur étude détaillée donne des informations scientifiques précieuses sur tous ces paramètres stellaires, beaucoup plus précises que ce qu'on pouvait obtenir dans le passé. Elle donne même des indications sur les détails de leur structure interne.

Par ailleurs, dans la mesure où les étoiles offrent une palette sonore riche et passionnante, rien n'empêche de transposer leurs vibrations pour les rendre audibles. Une musique originale, céleste, peut ainsi être composée. C'est un retour à la vieille idée de « musique des sphères », dans un contexte totalement renouvelé.

### De l'ancienne à la nouvelle musique des sphères

La découverte des vibrations sonores des étoiles nous reporte des millénaires en arrière, à l'époque des anciens philosophes grecs, qui avaient déjà relié la musique et l'astronomie en décrivant une « musique des sphères » très symbolique. Cette musique des sphères de l'Antiquité n'existe pas, mais il est intéressant d'y revenir pour mieux comprendre la manière dont se fait l'évolution des connaissances scientifiques.



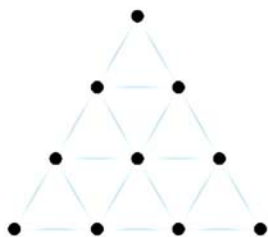
*Fig.1. Le monde selon Franchinus Gaffurius, moine contemporain de Copernic, qui présente encore la Terre fixe au centre du monde, entourée des sept planètes de l'Antiquité (à droite), surmontées par le firmament étoilé. À chaque planète est associée une muse (à gauche), ainsi que la Terre et le firmament dont la muse est Uranie. Les textes intermédiaires indiquent les « modes musicaux » (nous pourrions dire à présent les « notes ») attribués à chaque planète. On reconnaît par exemple ici le phrygien pour Mars et le dorien pour le Soleil.*

Ces philosophes ne connaissaient du ciel et de l'espace que ce qu'on peut en voir à l'œil nu : le Soleil, la Lune, les étoiles et les planètes, astres errants au milieu des étoiles. En assimilant le Soleil et la Lune à des planètes, cela portait leur nombre à sept : dans l'ordre la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, le tout entouré des étoiles du firmament. Le Soleil occupait donc la place particulière de pilier central. Les planètes tournaient autour de la Terre d'un mouvement circulaire uniforme, et elles étaient sphériques, forme parfaite par excellence. C'est ainsi que les

(\*) Voir La Nouvelle Musique des Sphères, éd. Odile Jacob, 2013

pythagoriciens, autour des années 500 av. J-C, concevaient l'Univers, image reprise plus tard par d'autres philosophes, comme Platon (428-348 av. J-C) ou Aristote (384-322 av. J-C).

En même temps qu'ils décrivaient le monde à leur manière, les pythagoriciens étudiaient les mathématiques et la musique. Ils s'intéressaient aux sons caractéristiques des cordes vibrantes, ainsi qu'aux intervalles musicaux obtenus en divisant leur longueur par des nombres entiers, de un à quatre. Ils n'allaient pas plus loin que quatre, sans doute parce que l'ensemble des nombres  $1+2+3+4$  est égal à dix, nombre particulier, exprimant la plénitude, comme on le retrouve dans l'image de la Tétraktys.



*Fig.2. La Tétraktys, figure exprimant l'harmonie, la symétrie et la stabilité telles que les pythagoriciens les concevaient dans leurs représentations du monde et de la musique.*

Les pythagoriciens ont ainsi découvert les intervalles musicaux harmonieux de base, la quarte, obtenue en faisant vibrer une corde limitée aux trois quarts de sa longueur, et la quinte obtenue avec une corde limitée aux deux tiers. À partir de ces intervalles, en les reproduisant de manière successive, ils ont construit une gamme qui, avec quelques modifications, est encore la nôtre. Elle comporte sept notes de musique, il y avait sept planètes, la tentation était forte de les associer, en attribuant une note de musique à chaque planète. Ainsi est née la première « musique des sphères ».

Cependant, ces belles théories avaient des défauts, des hiatus, à la fois pour l'astronomie et pour la musique. Les anciens Grecs savaient déjà que les planètes ne tournaient pas vraiment d'un mouvement circulaire uniforme autour de la Terre. Lorsqu'on observe le mouvement de la planète Mars dans le ciel au cours du temps, d'une nuit à l'autre, on la voit se déplacer dans une direction par rapport aux étoiles, et parfois revenir en arrière pour repartir ensuite dans la première direction. Par ailleurs, on voit toujours les planètes Mercure et Vénus à proximité du Soleil, contrairement à Jupiter ou Saturne. Comment cela peut-il s'expliquer si toutes ces planètes tournent de la même manière autour de la Terre ?

En musique non plus, rien n'est parfait. La succession des notes obtenues par intervalles

successifs de quintes ou de quarts justes ne se reboucle pas sur elle-même. La musique refuse de se plier directement à la théorie des nombres<sup>1</sup> !

Comment réagir à ces défauts qui montrent que la théorie n'est pas parfaite ? Il y a deux attitudes opposées, très instructives pour l'analyse de l'évolution des connaissances dans les sociétés humaines. La première est celle de Platon et d'Aristote, qui consistait à refuser les évidences observationnelles, pour n'accepter que la perfection des théories élaborées par l'esprit humain.

La deuxième attitude est celle d'Aristarque de Samos (310-230 av. J-C). Elle consiste à prendre les observations comme des informations instructives, qu'il convient d'étudier en détail pour mieux avancer dans la quête de la connaissance. Ses observations du ciel ont conduit Aristarque à proposer, bien avant Copernic et Galilée, le premier modèle héliocentrique du monde, où la Terre était considérée comme une planète qui tournait autour du Soleil. Ceci est attesté par Archimède de Syracuse dans son livre « l'Arénaire ». Les idées d'Aristarque étaient cependant trop en avance sur leur temps et le modèle du monde prôné par Aristote fut le seul accepté par la société et la religion, au cours du Moyen Âge occidental, pendant de nombreux siècles.

On parle souvent de « révolution copernicienne ». Il est vrai que le modèle héliocentrique de Copernic a finalement réussi à s'imposer à la société et à mettre en retrait celui d'Aristote, mais Copernic n'a rien inventé, car les idées d'Aristarque étaient connues. Giordano Bruno, brûlé vif à Rome pour hérésie en 1600, est d'ailleurs allé beaucoup plus loin que Copernic, en imaginant l'Univers infini.

Par la suite, Kepler a montré que les orbites des planètes étaient des ellipses, plutôt que des cercles. Il n'avait cependant pas rejeté les idées musicales ! Il imaginait leur mouvement autour du Soleil comme un concert perpétuel, une musique dans laquelle intervenaient les excentricités des ellipses ! C'est grâce à Newton et à ses études de la gravitation que les astronomes ont pu donner une explication physique du mouvement des planètes, au-delà de la simple description. Dès lors, l'étude de l'Univers s'est fondamentalement dissociée de la musique même si l'exaltation devant l'immensité de l'espace a toujours conduit des musiciens à créer des œuvres musicales parfois magnifiques. Il ne s'agissait cependant plus de liaison théorique fondamentale entre les deux, seulement d'inspiration artistique.

<sup>1</sup> Voir la symphonie des étoiles, éd. Albin Michel 1996 chapitre 9.



Nous savons à présent que le Soleil, pas plus que la Terre, n'est le centre du monde. Il se trouve dans les régions extérieures d'une Galaxie, qui contient plus de cent milliards d'étoiles, et il y a des centaines de milliards de galaxies dans l'Univers observable. Alors est arrivée la surprise, cette découverte inattendue, très récente, des vraies résonances sonores des étoiles. Ce ne sont pas les planètes, qui font de la musique, mais bien les étoiles<sup>2</sup> !

## Héliosismologie

Le 16 octobre 1961, la revue américaine d'astronomie « *Astrophysical Journal* » reçoit une proposition d'article de la part de trois astrophysiciens du « *California Institute of Technology* », situé à Pasadena, près de Los Angeles. Les auteurs, Robert Leighton, Robert Noyes et George Simon, ont découvert dans l'atmosphère du Soleil des mouvements très réguliers, avec une période d'environ cinq minutes, ce qui correspond à une fréquence de l'ordre de trois millièmes d'hertz. Ces mouvements se superposent à tous ceux qui se produisent dans les régions externes du Soleil, comme la granulation, les protubérances, etc. Ils s'en distinguent parfaitement grâce à leur régularité et leur faible période comparée aux autres. Ils n'avaient pas été détectés jusque-là en raison de leur faible amplitude et du fait que les instruments appropriés n'existaient pas encore.

La méthode utilisée est reliée à l'effet Doppler-Fizeau. Il s'agit d'une utilisation précise de la spectroscopie optique. Le rayonnement solaire, du rouge au violet, contient un nombre immense de raies spectrales dues à l'absorption du rayonnement, à des longueurs d'onde bien précises, par les atomes qui se trouvent dans l'atmosphère du Soleil. Si cette atmosphère est soumise à des mouvements réguliers qui font osciller la matière autour d'une position d'équilibre, les longueurs d'onde des rayonnements que nous recevons reflètent directement ces oscillations. Elles sont raccourcies, donc plus bleues, si la matière se rapproche, allongées, donc plus rouges, si elle s'éloigne. Les astrophysiciens ont mis au point des instruments qui peuvent mesurer très précisément les variations des longueurs d'onde reçues et mettre en évidence leurs oscillations.

Une dizaine d'années après la découverte des oscillations de l'atmosphère solaire, trois chercheurs américains en donnent l'explication de manière indépendante. Ce sont Roger Ulrich, en 1970, John

Leibacher et Bob Stein, en 1971. La grosse sphère gazeuse est soumise à des ondes acoustiques internes, c'est-à-dire des ondes sonores, comme les caisses de résonance de nos instruments de musique, sauf que le Soleil n'a pas de paroi. C'est une « sphère autogravitante », c'est-à-dire que la matière y est retenue par l'effet de son propre poids. Sa densité décroît très vite vers l'extérieur, jusqu'à devenir trop faible pour que les ondes sonores puissent continuer à se propager. Elles restent donc piégées à l'intérieur. L'atmosphère, qui joue le rôle de paroi virtuelle, subit des variations régulières de pression que les astronomes peuvent détecter en utilisant les techniques appropriées.

La découverte des vibrations solaires fut une réelle surprise pour les astrophysiciens, qui ne l'avaient pas du tout anticipée, car le Soleil ne faisait pas partie des classes d'étoiles dites « variables ». À présent l'analyse détaillée de ses vibrations permet de connaître sa structure interne avec une précision de l'ordre de 0,1 %. Cette étude a pris le nom d'héliosismologie. On sait maintenant que toutes les étoiles semblables au Soleil sont elles aussi des caisses de résonance, chacune avec une signature sonore qui lui est propre.

## Astérosismologie

D'une manière générale, on appelle « étoiles variables » toutes les étoiles dont l'éclat dans le ciel varie au cours du temps. Certaines sont le siège d'explosions, comme les variables cataclysmiques, les novae, ou les supernovae. D'autres sont des variables périodiques, parfois appelées « étoiles pulsantes ». C'est le cas, par exemple, des « céphéides » et des « RR Lyrae ».

Ces étoiles ont des pulsations de grande amplitude, comme des ballons de football qui se gonflent et se dégonflent – ce sont alors des oscillations radiales – ou des ballons de rugby qui s'aplatissent en ressemblant à des soucoupes volantes, pour ensuite reprendre leur forme initiale – dans ce cas, ce sont des oscillations non radiales. Les variations de lumière correspondantes sont si grandes qu'elles peuvent être facilement détectées avec de petits instruments d'observation.

C'est en étudiant ces étoiles variables, dans l'équipe du professeur Pickering à Harvard, à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, que l'astronome Henrietta Leavitt découvrit la relation période-luminosité des céphéides. Plus l'étoile est intrinsèquement brillante, plus ses oscillations sont lentes. Cette relation a permis ensuite de déterminer des distances d'étoiles et de galaxies dans l'Univers et de montrer que le Soleil n'est pas le centre de notre propre Galaxie.

---

<sup>2</sup> Il est possible que les planètes, en particulier Jupiter, présentent des vibrations sonores, mais cela n'est pas encore certain.

Seules quelques étoiles présentent ce type de vibrations périodiques de grande amplitude. Elles sont dues à des ondes sonores excitées par un phénomène particulier, appelé « mécanisme kappa ». Cela correspond à une capacité plus ou moins grande de la matière de capter l'énergie lumineuse. Il existe certaines régions, à l'intérieur des étoiles, où la matière retient mieux l'énergie lumineuse lorsqu'elle est comprimée, et d'autres où c'est l'inverse. La raison de cette différence est complexe, liée aux conditions de température, densité, pression et composition chimique. Dans le premier cas les ondes sonores sont amplifiées parce qu'elles récupèrent de l'énergie à la compression, alors que dans le second cas elles sont amorties.

Dans les étoiles variables de grande amplitude, comme les céphéides, les ondes sonores sont amplifiées. Le Soleil ne se trouve pas dans ce cas, heureusement pour nous. Pourrions-nous imaginer un Soleil pulsant, qui pourrait devenir deux fois plus brillant en une dizaine de jours ? Dans ces conditions, la vie n'aurait jamais pu se développer sur Terre.

Nous voici de retour à la surprise du 16 octobre 1961. Des oscillations périodiques de la surface solaire ? Comment est-ce possible ? Tous les calculs montrent que, dans une étoile comme le Soleil, les ondes sonores ne peuvent pas être entretenues. Elles sont toujours amorties.

Alors on se souvient que les régions extérieures du Soleil sont convectives. En raison des conditions de température qui y règnent, le gaz qui constitue la matière solaire fait des bulles qui montent exploser à la surface, puis cette matière retombe vers les profondeurs. Cette zone convective, qui s'étend sur un tiers du rayon solaire environ, est souvent comparée à de l'eau qui bout, même si la situation n'est pas la même puisque le Soleil est gazeux. Mais il s'agit dans les deux cas de convection, et la convection fait du bruit. Lorsque l'eau bout dans une casserole, les mouvements de matière produisent des ondes sonores qui se dissipent rapidement dans l'air ambiant, mais qui sont toujours renouvelées tant que l'eau continue à bouillir.

Le Soleil n'est donc pas une étoile variable au sens des céphéides, car sa structure interne ne permet pas d'amplifier les ondes sonores. Cependant la convection qui mélange en permanence ses régions externes produit sans arrêt de nouvelles ondes, toujours amorties mais toujours reformées. Ces ondes se propagent à l'intérieur de la grosse sphère et la font vibrer doucement, selon ses possibilités de résonance interne, avec une amplitude beaucoup plus faible que celle des céphéides, et aussi une période beaucoup plus faible. En effet, le Soleil

vibre dans des harmoniques élevées, les seules qui peuvent être excitées par la zone convective. Les variations de lumière qui en résultent sont nettement plus faibles que 0,1 pour cent, ce qui n'est pas sensible pour nous, ni pour nos yeux ni pour la chaleur reçue. Il fallait des instruments très précis, spécialement adaptés pour mesurer les vitesses superficielles de l'atmosphère solaire pour pouvoir détecter ces vibrations.

Beaucoup plus récemment, d'autres instruments ont permis de découvrir les fréquences de résonance d'étoiles semblables au Soleil. Chacune d'elles a une signature sonore qui lui est propre. L'étude détaillée des résonances acoustiques des étoiles apporte aux astronomes des informations précieuses sur leur structure et leur évolution. Une nouvelle science est née, l'astérosismologie.

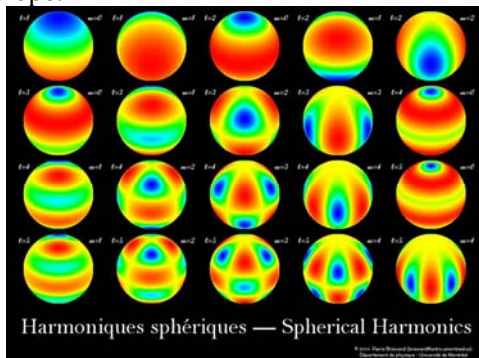
La première détection de la résonance acoustique d'une étoile semblable au Soleil date de 1999. Elle est due à une équipe française d'une dizaine de personnes, qui ont observé Procyon, l'étoile la plus brillante de la constellation du « Petit Chien », depuis l'Observatoire de Haute-Provence. Peu de temps après, en 2001, ont été dévoilées, grâce à des observations faites au Chili, les harmoniques de l'étoile alpha Centauri A.



*Fig.3. Amas ouvert NGC 290 observé avec le HST. Crédit: ESA & NASA. De très nombreuses étoiles présentent des oscillations acoustiques, observées avec les mêmes instruments que ceux utilisés pour la détection d'exoplanètes.*

Les découvertes n'ont cessé de se succéder depuis cette date. Elles ont été obtenues grâce à deux méthodes principales, les mêmes que celles utilisées dans le but de détecter des exoplanètes. La première méthode est celle de spectrographie, encore appelée « méthode des vitesses radiales » semblable à celle que j'ai déjà décrite pour le Soleil. Des spectrographes de haute précision ont été construits dans ce but, en particulier au Chili (HARPS, qui signifie « High Accuracy Radial velocity Planetary Search project »), ou à l'Observatoire de Haute-Provence (SOPHIE). La deuxième méthode est photométrique, c'est-à-dire qu'on étudie les

variations de lumière de l'étoile. Cette méthode est essentiellement utilisée depuis l'espace, grâce à des télescopes spatiaux spécialement construits dans ce but (COROT, lancé en décembre 2006, qui a cessé de fonctionner après avoir apporté de nombreux résultats, et *Kepler*, télescope américain lancé en mars 2009, qui fonctionne encore actuellement). D'autres instruments spatiaux sont en cours d'étude, dont les projets TESS, aux États Unis, et PLATO, en Europe.



**Fig.4.** Exemples d'harmoniques sphériques. Crédit : Pierre Brassard, Université de Montréal. Les résonances acoustiques internes des étoiles produisent des variations périodiques de lumière que les astronomes réussissent à observer. Ils analysent le signal qui peut être décomposé en nombreuses harmoniques sphériques.

D'une manière générale, toutes les étoiles semblables au Soleil qui ont pu être observées avec une grande précision sont le siège de vibrations acoustiques. Les grosses étoiles ont des fréquences plus graves que les petites étoiles et l'amplitude de leurs vibrations est plus importante. L'astérosismologie permet à présent de déterminer les paramètres stellaires avec une précision beaucoup plus grande que par les méthodes traditionnelles. Elle est en particulier beaucoup utilisée pour caractériser les étoiles centrales de systèmes planétaires, ce qui permet par conséquent une meilleure détermination des caractéristiques des planètes détectées.

## La musique des étoiles

Dans l'Antiquité, les notes de musique attribuées aux planètes correspondaient non pas à la résonance naturelle d'une sphère, mais aux harmoniques d'une corde vibrante. Tout cela était symbolique. À présent, ce que nous observons, c'est la vraie musique des sphères.

Mais peut-on vraiment dire que les étoiles font de la musique ? Non, évidemment. Les étoiles ne font pas plus de musique que le violon ou la guitare. C'est le musicien qui utilise les instruments comme outils de création et de représentation musicale. Les étoiles ne font pas de musique, mais elles peuvent être

utilisées comme des instruments de musique, seules ou parmi d'autres instruments.

Les sons des étoiles, qu'il nous est impossible d'entendre directement, doivent être transposés d'au moins 18 octaves pour devenir accessibles à nos oreilles. Comme il s'agit d'harmoniques sphériques, les notes « jouées » par les étoiles ne correspondent pas aux notes de notre gamme occidentale. Le résultat en est d'autant plus intéressant.

Dans notre échelle contemporaine, où le « la » du diapason correspond à 440 hertz, le Soleil résonne approximativement en sol dièse, ce qui est plutôt amusant. De très nombreuses harmoniques sont aussi excitées, qui lui donnent un timbre bien particulier, différent de celui de tous les autres instruments connus. Il en va de même pour les étoiles. Chacune présente une fréquence maximale, la « note » de base, et un timbre associé, tous différents les uns des autres. Nous sommes loin de la musique des sphères de l'Antiquité, fondée sur l'arithmétique et les divisions d'une corde vibrante. Nous devons sauter dans le siècle actuel, où la musique rejoint l'astronomie et l'étude du cosmos d'une manière totalement nouvelle.

J'ai fourni dans ce but au musicien compositeur Claude Samuel Lévine un ensemble de douze étoiles dont les fréquences sonores sont bien connues, y compris le Soleil. Les sons bruts de ces étoiles peuvent être écoutés, avec une transposition de 18 octaves, et il a composé une oeuvre musicale très intéressante et originale à partir de ces étoiles. Place à la musique céleste !



**Fig.5.** Claude-Samuel Lévine et Sylvie Vaclair jouant un duo de thérémines pour symboliser les étoiles alpha Centauri A et B. Le fond d'écran est celui du synthétiseur de sons permettant la création musicale à partir des fréquences observées des étoiles. Le thérémine est un instrument électronique émettant des ondes électromagnétiques qui peuvent être modulées par les positions des mains dans l'air ambiant, et transformées en ondes sonores grâce à une « sono » classique.

Pour en savoir plus et écouter la musique :  
Sylvie Vaclair, Claude-Samuel Lévine, La Nouvelle  
Musique des Sphères, Odile Jacob 2013

[www.sylvievaclair.fr](http://www.sylvievaclair.fr)  
[www.cslevine.com/etoiles](http://www.cslevine.com/etoiles)



# ARTICLE DE FOND

## Histoire de l'atmosphère de la Terre

David Bernard (david.s.bernard@gmail.com), Mathieu Barthélemy, Jean Lilensten

Suite de l'article paru dans le numéro précédent.

### L'Archéen : de -4,0 Ga à -2,5 Ga

L'Archéen est la période des temps géologiques qui s'étend de -4 milliards d'années à -2,5 milliards d'années. Elle a été marquée à son début, vers -3,9 Ga, par un événement retentissant : le LHB (pour « Late Heavy Bombardment »), un bombardement météoritique intense et tardif, a priori imputable à la migration de Jupiter. Bien que différents modèles s'affrontent concernant le LHB, allant d'un bombardement régulier et décroissant jusqu'à un événement extrêmement ponctuel (et par conséquent plus intense), il semble dans tous les cas que l'impact sur l'atmosphère ait été réduit, ou au moins limité dans le temps.

D'un point de vue géologique, l'Archéen voit apparaître les plus anciennes roches connues aujourd'hui : il s'agit des gneiss d'Acasta. Ces roches volcaniques fournissent de précieuses informations aux géologues sur les processus dynamiques alors en place (tectonique des plaques, mécanisme de subduction, gradients géothermiques, etc.). À peine plus récents, les gneiss d'Isua au Groenland, plus vieilles roches volcanosédimentaires mises au jour, mettent en évidence (de manière bien plus directe que les zircons de Jack Hills) l'existence d'océans d'eau liquide stables il y a 3,8 Ga. Cependant, malgré l'existence de ces structures géologiques, véritables « mémoires de la Terre », très peu d'informations sont disponibles concernant la composition de l'atmosphère, et il est nécessaire de faire appel à la modélisation. Le modèle de référence communément utilisé est celui de *Kasting (1993)*, dont nous allons présenter les grandes lignes :

- La pression partielle en CO<sub>2</sub> initiale est de l'ordre de 1 bar (celle que nous avons à la fin de l'Hadéen), décroissant par les processus de carbonatation.

- La pression en eau, de l'ordre de 10<sup>-2</sup> à 10<sup>-3</sup> bars, varie localement avec la température (comme de nos jours).

- Comme précédemment, la pression de N<sub>2</sub> est supposée être de 1 PAL (Present Atmospheric Level), soit environ 0,8 bars.

- La pression en méthane est supposée être de l'ordre de 10 à 100 PAL (10<sup>-5</sup> à 10<sup>-4</sup> bars). Si à l'Hadéen, l'origine du méthane se trouvait dans les réactions de serpentinisation de la croûte recouvrant l'océan magmatique, à l'Archéen, ce sont principalement les circulations hydrothermales importantes qui altèrent les roches basiques et ultrabasiques de la croûte océanique et libèrent du méthane. Certains auteurs ont avancé l'hypothèse d'une teneur encore plus élevée, sous l'impulsion de colonies de bactéries méthanogènes (dont l'existence et l'étendue à cette époque restent encore à prouver). Si le cas du méthane est autant débattu, c'est que, comme à l'Hadéen, il est envisagé comme gaz à effet de serre efficace pour éviter l'existence d'une Terre-boule-de-neige (voir encadré « Le paradoxe du Soleil jeune » dans le CC n° 148).

- Le modèle de Kasting prévoit en plus dans l'atmosphère des gaz tels que CO, NO ou HCN. Cependant, ceux-ci restent hypothétiques (leur présence est basée sur une composition des rejets volcaniques identiques à ceux que nous connaissons actuellement, hypothèse assez improbable vu la différence de composition du manteau) et leurs proportions difficilement quantifiables.

- Enfin, nous allons nous intéresser au cas du dioxygène. À l'Archéen, la seule source de O<sub>2</sub> est abiotique : il s'agit de la photolyse de l'eau atmosphérique, suivie de l'échappement de H<sub>2</sub> (un processus encore à l'œuvre de nos jours). L'oxygène formé réagit alors avec les gaz volcaniques réducteurs, conduisant à une pression partielle en O<sub>2</sub> très faible, de l'ordre de 10<sup>-10</sup> bars. Cette valeur très faible du dioxygène dans l'atmosphère est attestée par l'existence de formations ferrifères rubanées (BIF : Banded Iron Formations : figure 5).



**Fig.5.** Exemple de formation ferrifère rubanée (BIF : Banded Iron Formation) prise à Gopping Gap, dans le craton de Pilbara (Australie, -3,4 Ga), montrant une alternance de niveaux noirs (cherts siliceux) et rouges (riches en oxyde de fer). Ces formations supposent un fer mobile, ce qui implique une atmosphère anoxique. Crédits : Hervé Martin.

Ces structures impliquent que le fer issu du lessivage des roches était alors en solution dans les océans, ce qui suppose une atmosphère et des océans réducteurs, donc possédant une très faible teneur en dioxygène (d'où la limite supérieure de  $10^{-10}$  bars fixée). Comme nous le verrons par la suite, la disparition de ces BIF après -2,2 Ga est une preuve forte de l'oxygénation de l'atmosphère.

## Le Protérozoïque : de -2,5 Ga à -540 Ma

### Le GOE, un changement révolutionnaire

Le Protérozoïque est la plus longue des périodes stratigraphiques, couvrant à elle seule 2 milliards d'années de l'histoire de la Terre. Elle contient l'événement le plus remarquable dans l'histoire de l'atmosphère terrestre, au moins en ce qui concerne la vie et son évolution : il s'agit de l'apparition de l'oxygène moléculaire dans l'atmosphère. Cet événement, qui s'est déroulé entre -2,4 et -2,0 Ga a reçu le nom de Great Oxidation Event (GOE). Durant cette période, la concentration en dioxygène dans l'atmosphère est passée de  $10^{-10}$  bars à une valeur comprise entre 0,5 et 5 % PAL (soit 1 à 10 mbar). D'un point de vue géologique, le GOE est attesté par au moins quatre événements majeurs et indépendants, que nous allons expliciter :

1. La disparition des BIF. Comme on l'a vu précédemment, les BIF (formation ferrifères rubanées, figure 5) proviennent de la précipitation locale du fer en solution dans l'eau. Or, pour que cet élément reste en solution, il faut qu'il se trouve sous son degré d'oxydation II, ce qui n'est pas possible dans des conditions oxydantes. Alors que les BIF sont des éléments abondants avant 2,2 Ga, leur

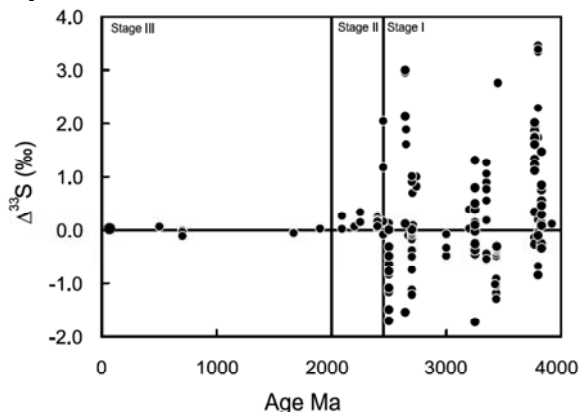
quasi disparition après cette date montre un changement dans le niveau d'oxydation de l'atmosphère.

2. L'apparition de paléosols oxydés. Les paléosols rouges apparaissent de manière massive après -2,2 Ga. Leur couleur est due à la présence d'oxydes et d'hydroxyde de fer (hématite, goethite, ...), dans lesquels le fer est sous son degré d'oxydation III. L'apparition des paléosols oxydés est donc l'exact pendant de la disparition des BIF : le fer n'étant plus mobile sous une atmosphère oxydante, il ne peut plus passer en solution dans l'eau pour aller former des BIF, et reste fixé sous la forme d'oxyde dans les sols.

3. La disparition des dépôts d'uraninite. Le cas est comparable à celui du fer. L'uranium existe sous deux états d'oxydation : U(+IV) et U(+VI). Sous sa forme réduite, il est peu soluble et précipite sous la forme de dépôts d'un minéral appelé uraninite  $UO_2$  (pechblende d'où est extrait l'uranium utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires). En revanche, sous sa forme oxydée, l'uranium est très soluble et reste en solution dans l'eau. La disparition des dépôts d'uraninite après -2,2 Ga atteste une nouvelle fois du changement rapide de l'état d'oxydation de l'atmosphère et des océans.

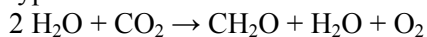
4. La modification du fractionnement isotopique du soufre. Il s'agit peut-être de la preuve la plus précise et qui pose les plus fortes contraintes sur l'enrichissement en dioxygène de l'atmosphère. Actuellement, le soufre atmosphérique subit un fractionnement dit « normal », c'est-à-dire dépendant directement de la masse selon un rapport prédit par la théorie cinétique des gaz. Or, Farqhar *et al.* (2000) ont mis en évidence l'existence d'un fractionnement anormal du soufre avant 2,2 Ga (figure 6). Ce fractionnement, qualifié par abus de langage d'« indépendant de la masse » (MIF : Mass Independent Fractionation), a été expliqué par Pavlov et Kasting en 2002. Il est induit par des réactions de photolyse du dioxyde de soufre sous l'effet d'un rayonnement UV. La majorité du  $SO_2$  se trouvant dans la troposphère, le passage d'un fractionnement anormal à un fractionnement dépendant de la masse à partir de -2,2 Ga traduit la mise en place d'une couche d'ozone stratosphérique, capable d'arrêter les rayonnements UV dissociants. Or, la pression partielle en dioxygène nécessaire pour que se mette en place une telle couche est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-6}$  bars. La découverte de changement de loi suivie par le fractionnement isotopique du soufre permet donc de poser une contrainte chiffrée sur la quantité de dioxygène, et marque de manière irréfutable le passage d'une atmosphère anoxique (avec une pression partielle en

O<sub>2</sub> inférieure à 10<sup>-5</sup> PAL) à une atmosphère oxydante.



**Fig.6.** Diagramme montrant l'évolution de  $\Delta 33S = \delta 33S - 0,515 \times \delta 34S$  (formule correspondant à un fractionnement « normal » du soufre). On peut voir très nettement que avant -2,2 Ga,  $\Delta 33S \neq 0$ , ce qui signifie que le soufre ne suit pas un fractionnement normal. Cette caractéristique a été interprétée par Pavlov et Kasting (2002) comme la mise en place d'une couche d'ozone, et donc d'une atmosphère riche en oxygène (D'après Farquhar et Wing (2003).

Les preuves de l'accumulation de dioxygène dans l'atmosphère autour de -2,3 Ga sont donc nombreuses, faisant du GOE l'un des événements les mieux datés et les mieux documentés dans les « archives géologiques ». La question qui se pose naturellement est donc celle de l'origine de cet élément. Le seul mécanisme connu capable de produire de grands volumes de dioxygène est la photosynthèse oxygénique, selon une réaction du type :



CH<sub>2</sub>O représente toutes les molécules organiques complexes susceptibles d'être formées par photosynthèse.



**Fig.7.** Stromatolites en développement, dans la baie de Shark en Australie. Ces roches biogéniques permettent d'attester la présence de vie il y a au moins 2,7 Ga. Crédits : Paul Harrison.

Autrement dit, c'est l'apparition de la photosynthèse oxygénique chez les cyanobactéries et les eucaryotes qui a permis l'enrichissement progressif

de l'atmosphère en dioxygène. Or, ceci pose a priori un petit problème chronologique, qui a conduit de nombreux auteurs à considérer, jusqu'à la découverte du fractionnement anormal du soufre, que l'atmosphère était oxydante bien avant -2,3 Ga. En effet, les cyanobactéries, responsables du changement d'état d'oxydation de l'atmosphère, sont apparues bien avant cette date : on sait de manière sûre, grâce aux stromatolites fossiles (figure 7), que ces bactéries étaient déjà présentes sur Terre il y a de cela 2,7 milliards d'années. Des traces plus anciennes, quoique moins certaines et beaucoup plus discutées, tendraient à prouver que la vie serait apparue bien avant, peut-être aussi tôt que -3,8 Ga. Quoi qu'il en soit, il existe dans tous les cas un « retard à l'oxydation », un délai entre la mise en place de la photosynthèse oxygénique et le début de l'enrichissement de l'atmosphère en dioxygène. Nous allons présenter succinctement les mécanismes possibles invoqués pour expliquer ce retard :

**1. La séquestration du carbone organique.** On a vu que la réaction de photosynthèse responsable du rejet dans l'atmosphère d'une molécule de O<sub>2</sub> conduit à la formation de molécules organiques, dans lesquelles le carbone se trouve sous une forme réduite. À la mort de l'organisme, ce carbone, s'il n'est pas soustrait du contact de l'atmosphère, sera à nouveau oxydé par le dioxygène atmosphérique, limitant de fait son accumulation. Il faut donc que le carbone organique soit séquestré à la mort des organismes photosynthétiques, ce qui est le cas actuellement par enfouissement dans les eaux peu profondes du plateau continental. Il est alors probable que le changement de style tectonique vers -2,5 Ga, avec l'apparition de larges plaques semblables aux plaques actuelles, ainsi que la fracturation à cette époque du supercontinent Kernoland, favorisant une remontée générale du niveau des eaux, soient responsables de la formation de vastes plateaux continentaux, rendant efficace ce mécanisme d'enfouissement du carbone.

**2. L'oxydation du fer en solution.** Comme nous l'avons vu précédemment, une des structures caractéristiques de la fin de l'Archéen est l'existence de larges formations ferrifères rubanées (BIF), formées par précipitation des ions ferreux dans l'océan au contact d'un milieu oxydant. Les cyanobactéries se développant sur des plateaux peu profonds, auraient alors enrichi localement l'atmosphère en dioxygène, conduisant à une oxydation superficielle des océans. Ces couches superficielles oxydées auraient ensuite été déplacées par la circulation océanique et mélangées à des couches plus profondes réductrices (donc contenant du fer



en solution), conduisant à la formation de BIF. Selon ce scénario, le dioxygène n'aurait pu commencer à s'accumuler dans l'atmosphère qu'après l'oxydation « totale » du fer présent en solution dans les océans.

### 3. L'oxydation progressive du manteau terrestre.

L'eau injectée dans le manteau au niveau des zones de subduction retourne dans l'atmosphère par l'intermédiaire des rejets volcaniques. Dans le cas d'un manteau plus réducteur, l'eau aurait réagi avec le fer mantellique, conduisant à un rejet de  $H_2$  qui, par réaction avec le  $O_2$  atmosphérique redonne de l'eau. L'oxygénation de l'atmosphère n'aurait pu se produire qu'après oxydation du manteau supérieur. L'analyse de laves datant de -3,8 Ga semble cependant montrer que l'état d'oxydation du manteau a peu changé, rendant caduque cette explication. Il reste que  $H_2$  n'est pas le seul gaz à réagir avec  $O_2$ , et d'autres modifications dans la composition des rejets volcaniques ont été avancées pour expliquer ce retard au GOE.

**4. La nécessité d'un Soleil « assez chaud ».** La dernière hypothèse avancée pour expliquer le retard à l'oxygénation de l'atmosphère est peut-être aussi la plus étonnante : il s'agit de la compétition entre les bactéries photosynthétiques et les chimiotrophes méthanogènes sous un Soleil froid. En effet, on a vu que le paradoxe du Soleil jeune impliquait a priori la présence d'un gaz à effet de serre efficace dans l'atmosphère pour autoriser des températures supérieures à  $0^\circ C$  à la surface de la Terre.

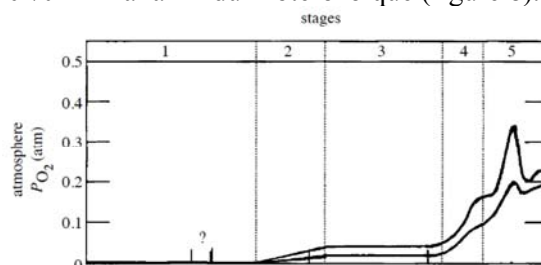
Supposons maintenant que des colonies de cyanobactéries se développent assez tôt dans l'histoire de notre planète, conduisant à l'oxygénation de l'atmosphère et des océans. Cette dernière aurait deux conséquences principales : une diminution de la quantité de méthane atmosphérique, et une intoxication des organismes méthanogènes (qui ne survivent que dans des milieux anoxiques). Le taux de méthane diminuant, la température de surface diminuerait aussi, conduisant éventuellement à une glaciation globale. Cette glaciation aurait à son tour deux impacts majeurs : une baisse de l'activité des cyanobactéries (d'une part parce qu'elles sont sensibles aux faibles températures, d'autre part parce qu'une couche de glace opaque au rayonnement visible rendrait moins efficace l'activité photosynthétique) et un arrêt de l'enfouissement du carbone (cf. cycle de Walker). Les archées méthanogènes pourraient alors proliférer, conduisant à une augmentation du taux de  $CH_4$  atmosphérique qui, couplée à une accumulation de  $CO_2$ , permettrait d'enclencher à

nouveau l'effet de serre, et donc de revenir à des températures positives. La Terre aurait alors connu plusieurs périodes de glaciations (certaines ont effectivement été enregistrées à -2,7 et -2,3 Ga) et de dégel, sous l'impulsion de cette compétition entre les différents organismes. Ce cycle aurait alors duré jusqu'à ce que le Soleil soit suffisamment chaud pour autoriser des températures positives sans le concours du méthane, permettant alors aux cyanobactéries de proliférer et d'enrichir l'atmosphère en dioxygène. Un des aspects attrayant de cette explication vient de la concomitance entre un Soleil suffisamment lumineux (autour de -1,9 Ga pour une quantité de  $CO_2$  égale à un PAL, un peu avant pour une quantité légèrement supérieure) et le GOE.

### Le « boring billion » et la fin du Protérozoïque : de -2,0 Ga à -540 Ma

Comparé à cette succession d'atmosphères depuis le début de l'histoire terrestre, le milliard et demi d'années restant concernant le Protérozoïque (de la fin du GOE vers -2,0 Ga jusqu'au début du Phanérozoïque à -540 Ma) semble étonnamment calme. Il se caractérise par une diminution de la concentration en  $CO_2$  par le processus de formation des carbonates, jusqu'à une valeur comprise entre 10 et 25 PAL vers -0,6 Ga (1 PAL = 300 ppmv, cette concentration de référence en  $CO_2$  atmosphérique correspondant à sa valeur pré-industrielle). Cette concentration a cependant pu connaître des variations d'amplitude plus importantes pendant cette période (par exemple à travers le mécanisme de Walker).

Concernant  $O_2$  il semblerait que la concentration soit restée stable pendant près d'un milliard d'années (appelé de ce fait « boring billion »), avant de connaître une nouvelle augmentation vers -0,8 Ga, pour atteindre une valeur au moins égale à 50 % PAL à la fin du Protérozoïque (figure 8).



**Fig.8.** : Évolution de la concentration en dioxygène dans l'atmosphère à travers 5 périodes : 1 (-3,85 à -2,45 Ga) ; 2 (-2,45 à -1,85 Ga) ; 3 (-1,85 à -0,85 Ga) ; 4 (-0,85 à -0,54 Ga) ; 5 (-0,54 Ga à aujourd'hui). La deuxième période, marquée par le début de l'enrichissement de l'atmosphère en dioxygène, correspond au Great Oxidation Event (GOE). La

période 3, au cours de laquelle la concentration de O<sub>2</sub> atmosphérique n'a pas ou peu évolué, a reçu le nom de « boring billion ». Cette concentration a alors de nouveau augmenté, est passée par une valeur maximale au carbonifère (imputable aux grands végétaux ligneux ayant colonisé les terres), avant de redescendre à sa valeur actuelle. Les courbes correspondent aux limites supérieures et inférieures probables de la concentration en O<sub>2</sub> dans l'atmosphère. D'après Holland (2006).

## Le Phanérozoïque : de -540 Ma à aujourd'hui

La Phanérozoïque est la période couvrant les 500 derniers millions d'années d'histoire de la Terre. Le choix de -540 Ma correspond à un événement biologique majeur : l'explosion cambrienne, une radiation évolutive ayant conduit en très peu de temps à la formation de la plupart des groupements biologiques actuels. Bien que le Phanérozoïque soit la période géologique la plus courte, elle est la plus détaillée et la plus documentée, ceci pour deux raisons : tout d'abord, étant la période la plus récente, de nombreuses « mémoires géologiques » (roches, minéraux, dépôts glaciaires) sont disponibles et n'ont pas été effacées par l'activité de surface, comme c'est le cas pour les structures plus anciennes ; ensuite, le développement massif de la vie a permis d'enregistrer, sous la forme de fossiles, les variations du climat et de la composition de l'atmosphère avec une précision temporelle inégalée. Aussi, bien que cette période ait sans doute connu les plus petites variations dans la composition atmosphérique, elle est aussi celle pour laquelle les données sont les plus abondantes et les variations les plus finement connues. Cette précision a conduit à découper cette période géologique en de nombreuses sous-périodes aux noms familiers (Cambrien, Carbonifère, Jurassique, Crétacé, ...).

L'étude de l'évolution détaillée de l'atmosphère au cours de cette période sort du cadre de cet article, dans la mesure où, comparativement aux échelles de temps et aux amplitudes de variations présentées jusque-là, l'atmosphère de la Terre est restée globalement stable et constante durant cette période. Des variations pouvant aller jusqu'à un ordre de grandeur ont tout de même été enregistrées, par exemple dans la concentration en CO<sub>2</sub>, avec des conséquences importantes comme de grandes glaciations. Ces variations restent cependant faibles dans les quantités mises en jeu par rapport à celles évoquées dans les sections précédentes.

Nous finirons en commentant tout de même deux modifications majeures de cette atmosphère au cours du Phanérozoïque. La première, visible sur la figure 9, est une augmentation sensible de la

concentration en dioxygène au cours du carbonifère, vers -300 Ma, jusqu'à environ 1,6 fois sa valeur actuelle. Celle-ci s'explique par la colonisation des terres émergées par les plantes terrestres et surtout l'apparition des grands arbres. Leur prolifération a conduit à une séquestration du carbone et à une augmentation du taux de dioxygène dans l'atmosphère, entre autre attestée par l'apparition d'insectes géants (comme Méganeura, une libellule d'environ 70 cm de long !).

La seconde modification importante de l'atmosphère, plus par sa vitesse que par son amplitude (pour le moment en tous cas) est l'augmentation drastique de la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique liée à l'activité humaine. La référence de 300 ppm pour le dioxyde de carbone correspond en effet à sa valeur préindustrielle.

Sa concentration atmosphérique est aujourd'hui plus proche des 400 ppm. Dans les derniers millions d'années (pour lesquels l'échantillonnage temporel est suffisamment bon), aucune augmentation aussi brutale n'a été détectée. La pollution au CO<sub>2</sub> ne semble avoir dans le passé qu'un seul équivalent en terme de grande « pollution » à l'échelle planétaire : l'oxydation globale par les cyanobactéries il y a 2,4 milliards d'années.

## Bibliographie

- M. Gargaud, T. Montmerle, R. Pascal, P. Lopez-Garcia, H. Martin, et al. Le Soleil, la Terre... la vie : la quête des origines. Belin, 2009.
- F.H. Shu, F.C. Adams, and S. Lizano. Star formation in molecular clouds-observation and theory. Annual review of astronomy and astrophysics, 25 :23–81, 1987.
- F. Tian, O.B. Toon, A.A. Pavlov, and H. De Sterck. A hydrogen-rich early earth atmosphere. Science, 308(5724) :1014, 2005.
- J.F. Kasting. Earth's early atmosphere. Science, 259(5097) :920, 1993.
- J.F. Kasting and D. Catling. Evolution of a habitable planet. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 41(1) :429–463, 2003.
- J. Farquhar, H. Bao, and M. Thiemens. Atmospheric influence of earth's earliest sulfur cycle. Science, 289(5480) :756, 2000.
- AA Pavlov and JF Kasting. Mass-independent fractionation of sulfur isotopes in archean sediments : strong evidence for an anoxic archean atmosphere. Astrobiology, 2(1) :27–41, 2002.
- H.D. Holland. The oxygenation of the atmosphere and oceans. Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences, 361(1470) :903, 2006.
- H.D. Holland. Why the atmosphere became oxygenated : A proposal. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(18) :5241–5255, 2009. ■

# VIE ASSOCIATIVE

## JOURNÉES DE FORMATION. ACADÉMIE DE BORDEAUX. PAF 2015

### Épisode 4. Observatoire de Floirac (OASU)

Le précédent épisode, souvenez-vous, s'était déroulé entre les caves et les donjons du Château d'Abbadia, à Hendaye, devant les eaux bleues du golfe de Gascogne. Aujourd'hui, retour vers le futur pour tout le monde, et retrouvailles sous les coupes de l'Observatoire, où nous avons été accueillis par Nathalie Brouillet pour une présentation rapide de l'OASU et des conférenciers-maison.

Retrouvailles aussi avec une bonne partie de nos stagiaires qui avaient déjà participé à l'une de nos précédentes aventures, puisque l'intitulé du stage portait la mention : « **Découverte de l'Astronomie – Niveau 2** ». Ce « Niveau 2 » nous a obligés, nous, de la planète CLEA, à ne pas sombrer dans la routine et à nous renouveler un peu. Tâche facilitée, par exemple, par la parution du **HS11-Constellations**, la future actualité de l'éclipse de Soleil du 20 mars prochain et la réserve des nombreux ateliers du CLEA.

Une fois les présentations faites, nous avons prêté toute notre attention à la conférence *éclairée* d'Emmanuel Di Folco (OASU) sur « **Le Soleil et les éclipses** », qui a fait toute la lumière sur les mystères de la chose qui, de temps en temps, nous fait le coup de « L'Etoile Noire », tout en nous invitant à pénétrer jusqu'au cœur de notre astre à l'épisodique masque de lune pour voir ce qu'il s'y passe.

Thème de l'éclipse aussitôt repris et développé immédiatement par l'atelier de Roseline (« **Éclipses : que faire avec les élèves ?** »). Ambiance studieuse, éclairage diffus, public captif, la maîtresse des lieux, dans son poncho « lumière cendrée », officie autour du Baader, boule de cristal bleutée où valsent les sphères, en veillant au bon calcul de « la vitesse des ombres » (je cite)... Un nuage passe, le Baader s'anime, sous les mains expertes de Gérard Prédignac : enfin, tout s'explique et les stagiaires s'éclipsent à regret, encore un peu dans la Lune...

Pendant ce temps, à l'autre bout de la galaxie, tout là-bas, sous la ceinture d'Orion, Brigitte Garreau tente de faire reconstituer à son groupe ladite « **Constellation en 3D** », en leur faisant enfilez des

perles (pour les filles) et des cotillons (pour les garçons) sur des bouts de ficelle à rôtir... But du jeu : lever le voile sur l'invisible, découvrir la vraie vérité sur les constellations. Comment deviner, en effet, que ces étoiles ne sont pas là où l'on croit qu'elles sont ? Eh bien, jetez un œil sur la « maquette » montée par Brigitte et Gérard, et, de perle en perle, vous voyagerez dans l'au-delà, au-delà de nos trompeuses apparences.

Après un repas dans les murs d'un joli château bordelais, l'atelier suivant (« **Zodiaque en 2D et 3D** ») voit Jean-Luc Fouquet se muer en conteur d'étoiles (à moins qu'il n'ait voulu parler de *compteur d'étoiles* ?), et donc, avec son double cercle pendu à une ficelle, il nous étalonne le ciel, nous promène bientôt sur l'écliptique et, en passant, nous défrise les astrologues et leur cortège horoscopique. Puis, armé maintenant d'un petit zodiaque animé et d'une carte tournante qu'il a fait construire à ses auditeurs, le roi de l'attache parisienne déclare (je cite) : « Si je tourne la carte vers le sud, je vois la Baleine, et vers le nord, je vois la Casserole ». Un peu fumante, la casserole, non ? Les stagiaires ont fini l'atelier sur le dos d'éléphants roses, survolant des Lions, des Lynx, des Licornes et autres Girafes...

Parallèlement, Maître Jean (Jean Ripert), notre infatigable passeur, s'embarque avec les siens pour une inquiétante odyssée vers Jupiter la Géante, autour de laquelle flotte l'énigmatique monolithe noir (« **Détermination de la masse de Jupiter** »). D'un satellite à l'autre, jonglant avec sa « règle molle » en millimètres, les minutes ou UA, Maître Yoda (non, je me trompe de film), Maître Jean entraîne son équipage dans les arcanes du calcul, avant d'affirmer (je cite) : « J'ai les valeurs, j'ai les valeurs ! ». Rassurant, pour nos nouveaux explorateurs de l'espace, qui ont vu le rusé personnage s'abriter derrière un problème de photocopie pour dissimuler une erreur de calcul, avant qu'il ne cherche à les piéger en leur donnant le choix entre plusieurs réponses qui n'en étaient pas. Ah, le fourbe ! Pas Maître Yoda, mais le comte Dooku, plutôt...

La conférence du soir porte sur la mission « **Rosetta** ». Bon, on en a beaucoup parlé



récemment, mais Didier Despoix (OASU) nous a si bien détaillé les raisons pour lesquelles il fallait se poser sur cette comète, dont je vous passerai le nom, et ce qu'on risquait de trouver d'important sur son corps glacé, qu'il a su prolonger notre attention jusqu'à sa destination finale.

Le deuxième jour s'ouvre sur « **Les exoplanètes** ». Franck Selsis (OASU) nous présente l'évolution des concepts dans la quête de ces nouvelles frontières, les méthodes de détection, la zone d'habitabilité, les éventuels signes de vie, avant que ne surgissent de nombreuses questions autour de l'apparition de la vie sur notre propre planète.

Puis, à la suite d'une inversion imprévue d'ateliers, nos deux animateurs-stentors se trouvent désormais face à face, dans la bibli, aux manettes de leur groupe respectif, Jean VS Daniel : la battle des astro-DJ peut commencer. « **Le spectre d'étoile** » contre « **Le repérage des constellations** » expliqué à la jeunesse. Les phrases volent, le ton monte, les annales de l'Académie des Sciences tombent des étagères... Les danseurs repartent avec, d'un côté, l'art et la manière de tirer le portrait d'une étoile, et, de l'autre, un dossier de 20 pages sur les constellations, inspiré du HS11, mais pas que...

L'après-midi, dans les mêmes lieux, tout le contraire : silence feutré, dans lequel seuls les murmures (allez, pour ne froisser personne, on va dire les douces voix...) de nos deux autres animateurs troublent à peine la somnolence postprandiale des stagiaires.

C'est dans ce ronron réflexif que Jean-Luc (« **Les cadrans solaires** ») explique, pas à pas, de 15 en 15 degrés, comment réaliser un cadran solaire élémentaire, certes, mais qui lit l'heure plus vite que son ombre, puis tente de démontrer à ses auditeurs perplexes qu'avec des gommettes collées sur la

vitre de leur classe, ils vont parvenir à percer les secrets de la course du Soleil... Une ombre plane (celle d'une gomme ?).

De l'autre côté, Roseline a distribué, pour son atelier (« **Démarche d'investigation à partir d'articles de journaux** ») un article relatant une visite extra-terrestre, accompagné de divers documents à partir desquels nos futurs détectives doivent lire entre les lignes pour démêler le vrai du faux. Avec le grain de sel de l'Inspecteur Ripert, découvriront-ils la vérité, dissimulée qu'elle est souvent derrière pas mal de faux-semblants ?

Dans l'après-midi, nous avons eu la visite de Vincent Besnard, CAST, délégué adjoint à l'action culturelle, correspondant « Sciences à l'École ». Nous n'oublions pas qu'il a été à l'origine (avec Roseline, côté CLEA) de cette formation-astronomie, reconduite depuis maintenant 4 ans.

Et, en fin d'après-midi, Caroline Soubiran (OASU) nous embarque sur le satellite « **GAIA** », lancé en décembre 2013, dont le but est de cartographier en 3D une partie de notre galaxie en caractérisant près d'un milliard d'objets, avec des localisations d'une précision telle que même l'épaisseur d'un cheveu, vu à 1000 km, tombera dans son escarcelle.

Le stage se termine par une visite de l'Observatoire, conduite cette année, par Sarah Fechtenbaum, doctorante à l'OASU.

Fin du voyage parmi les étoiles. Vous pouvez détacher vos ceintures. Aurons-nous l'occasion de repartir l'an prochain visiter un autre coin de l'univers ?

Tous les Cléanauts ici présents le souhaitent ardemment. Et donc, peut-être à bientôt pour de prochaines aventures... ■

### Solutions des mots croisés page 16

#### Horizontalement

1. Habitabilité. ; 2. Ys. Liqueur ; 3. Devenu. Neige ; 4. Sénats ; 5. Omis. UO. St (stère) ; 6. Gel. Oxygène. ; 7. Erich. EO (est-ouest). III (Cassini III leva la carte de France à la demande de Louis XV) ; 8. Noël (le 25 décembre était à l'origine la fête du solstice d'hiver). Trapèze (d'Orion : les 4 étoiles au centre de la nébuleuse) ; 9. Europe (le deuxième satellite galiléen de Jupiter posséderait un océan d'eau salée sous sa croûte de glace). Lires.

#### Verticalement

1. Hydrogène ; 2. ASE (Agence Spatiale Européenne, ou ESA en anglais). Mérou ; 3. Voilier ; 4. Île. Clo ; 5. Tins. Oh ; 6. Aqueux. Té ; 7. Bu. Noyer ; 8. Iéna. Goal ; 9. Luette. Pi ; 10. Iris (en plus des iris d'eau, de l'iris de l'œil et des iris de Van Gogh, IRIS est aussi un logiciel d'astrophoto et plus récemment un télescope automatique dédié à l'enseignement installé à l'OHP). Nier ; 11. Seize (8 protons et 8 neutrons pour l'oxygène le plus courant) ; 12. Évén. IES.

## École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.



Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :  
[acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea](http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea)

## Les productions du CLEA

*En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.*

*Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :*

### Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

### Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

### Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

### DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Écoles d'Été d'Astronomie).

*Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>*

Le formulaire de commande est sur le site.

## Le site internet

**Une information toujours actualisée**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)



# LES CAHIERS CLAIRAUT



**Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :**

Articles de fond  
Réflexions  
Reportages  
Textes (extraits, citations, analyses)  
Pédagogie de la maternelle au supérieur  
TP et exercices  
Curiosités  
Histoire de l'astronomie  
Réalizations d'instruments et de maquettes  
Observations  
Informatique  
Les Potins de la Voie Lactée

# COMMENT NOUS JOINDRE ?

**Informations générales :**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)

OU

[www.ac-nice.fr/clea](http://www.ac-nice.fr/clea)

**Siège social :**

CLEA, c/o CFEED  
case courrier 7078  
Université Paris Diderot  
5, rue Thomas Mann  
75205 PARIS Cedex

**École d'Été d'Astronomie :**

[daniele.imbault@cea.fr](mailto:daniele.imbault@cea.fr)

**Cahiers Clairaut :**

[christianlarcher3@gmail.com](mailto:christianlarcher3@gmail.com)

**Ventes des productions :**

[http://ventes.clea-astro.eu/](http://ventes.clea-astro.eu)

**Site internet :**

[berthomi@ac-nice.fr](mailto:berthomi@ac-nice.fr)  
[charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr](mailto:charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr)

**Adhésion / Abonnement :**

Adhésion CLEA pour 2014 :	<b>10 €</b>
Abonnement CC pour 2014 :	<b>25 €</b>
Adhésion + abonnement CC :	<b>35 €</b>
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	<b>40 €</b>

**Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>**

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari  
Rédacteur de publication : Christian Larcher  
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUÈS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979  
Numéro CPPAP : 0315 G 89368  
Prix au numéro : 9 €  
Revue trimestrielle : numéro 149 mars 2015